



Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Ciencias Químico Biológicas

Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Transferencia de calor en el escaldado de espárrago
(*Asparagus officinalis* L.) y evaluación de parámetros de
calidad

TESIS

Que presenta

LUIS CARLOS SOTO LÓPEZ

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIA

Y

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Director de Tesis

DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES

El presente trabajo fue realizado en 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 del Dr. José de Jesús Caro Corrales, así como la asesoría de la Dra. Irma Leticia Camacho Hernández y la Dra. Rosalina Iribe Salazar. El IQ Luis Carlos Soto López 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 Rosales el día 13 del mes Febrero del año 2020, el (la) que suscribe Luis Carlos Soto López alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos con número de cuenta 0814504-0, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autor (á) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José de Jesús Caro Corrales y cede los derechos del trabajo titulado "Transferencia de calor en el escaldado de espárrago (*Asparagus officinalis* L.) y evaluación de parámetros de calidad", 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.

Luis Carlos S.L
Luis Carlos Soto López

Nombre completo y firma

AGRADECIMIENTOS

Lo que soy y lo que he logrado se lo debo a mi familia. Agradezco y siempre agradeceré a mis padres: Gilberto y Maribel, padres que con su esfuerzo me han motivado a alcanzar mis metas y que con su apoyo sincero e incondicional me han dado seguridad para afrontar los retos. A mis hermanos: Gilberto, Isabel y Alejandra; siempre serán mi equipo y mis logros son suyos también.

Gracias a la Preparatoria El Fuerte Extensión Tres Garantías, a la Facultad de Ciencias Químico Biológicas, y al Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, todos parte de la Universidad Autónoma de Sinaloa, institución en la que me he formado y que, a través de sus profesores, ha estimulado mi interés por el aprendizaje. Gracias al CONACYT, cuyo apoyo fue fundamental para la culminación de esta obra.

Gracias a mi director de tesis: Dr. José de Jesús Caro Corrales, así como a mis asesoras, Dra. Irma Leticia Camacho Hernández y Dra. Rosalina Iribe Salazar, personajes que siempre dieron la cara por este trabajo. Me siento orgulloso de que sus nombres figuren en esta tesis. Un honor haber sido su alumno.

Valdo, gracias por estar al pendiente. Gracias, Tania; lejos, pero siempre presente. Víctor, especialmente gracias a ti.

Gracias a mis compañeros de laboratorio. A los grandes: Yessica, Julio, Carlos Andrés y César; maestros y modelos a seguir. A los de mi generación: Olivia, Feli y Rogelio; se les aprecia y admira. Y a los nuevos: Mely, Miriam y Benji; ayudar y enseñar a los demás es la máxima expresión de los conocimientos que posees, crecí mucho con ustedes.

A mis compañeros de generación. Nadie te apoya mejor que alguien que te comprende, pasamos por la misma situación y crecimos como académicos juntos, pero también como personas.

A todos, gracias totales. Porque esta tesis fue un trabajo en equipo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE CUADROS	xi
I RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN DE LA LITERATURA	8
A ESPÁRRAGO	8
1 Generalidades	8
2 Valor nutrimental	8
3 Producción	12
a Mundial	12
b Nacional	12
4 Manejo poscosecha	15
B ESCALDADO	15
1 Generalidades	15
2 Propósitos del escaldado	16
3 Efecto del escaldado sobre los atributos de calidad	18
C TRANSFERENCIA DE CALOR	19
1 Mecanismos de transferencia de calor	19

a	Conducción	19
b	Convección	20
c	Radiación	22
2	Transferencia de calor por conducción en estado inestable	22
a	Ecuación general de conducción en estado inestable	23
b	Transferencia de calor con resistencia interna despreciable	25
1)	Parámetros concentrados	25
c	Número de Biot	27
d	Transferencia de calor con resistencia interna y externa finitas	28
1)	Placa infinita	28
2)	Cilindro infinito	29
3)	Esfera	31
D	PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE HORTALIZAS	32
1	Conductividad térmica (k)	33
2	Capacidad calorífica específica (C_p)	33
3	Densidad (ρ)	34
4	Difusividad térmica (α)	34
E	SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ALIMENTOS	36
1	Generalidades	36
2	Ventajas de los modelos de simulación	36

3 Métodos numéricos para la simulación	37
a Análisis con elemento finito	37
IV JUSTIFICACIÓN	39
V HIPÓTESIS	41
VI OBJETIVOS	42
A OBJETIVO GENERAL	42
B OBJETIVOS ESPECÍFICOS	42
VII MATERIALES Y MÉTODOS	43
A MATERIALES	43
1 Materia prima	43
B MÉTODOS	43
1 Escaldado tradicional	43
2 Parámetros fisicoquímicos	43
a Humedad	44
b pH	45
c Acidez titulable	45
d Sólidos solubles totales	46
e Firmeza	46
f Diferencia total de color (ΔE)	46
g Compuestos fenólicos	47

3	Parámetro nutrimental	48	
	a	Contenido de Vitamina C	48
4	Parámetro enzimático	49	
	a	Actividad de Peroxidasa	49
5	Determinación de propiedades termofísicas de turiones de espárrago	51	
	a	Conductividad térmica (k)	51
	b	Capacidad calorífica específica (C_p)	53
	c	Densidad aparente (ρ)	53
	d	Difusividad térmica (α)	53
6	Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)	54	
7	Simulación de la transferencia de calor	56	
8	Métodos estadísticos	57	
	a	Caracterización en fresco	57
	b	Diseño experimental	57
	c	Optimización	57
	d	Análisis de datos	59
	e	Validación del modelo de predicción	59
	f	Contraste del espárrago escaldado optimizado respecto al fresco	60
	g	Propiedades termofísicas	60
VII	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61	

A CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA, FITOQUÍMICA, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICA DE TURIONES DE ESPÁRRAGO FRESCO	61
1 Caracterización fisicoquímica	61
2 Caracterización fitoquímica	64
3 Caracterización nutrimental	66
4 Caracterización enzimática	68
B MODELOS EXPERIMENTALES DE REGRESIÓN PARA PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS, FITOQUÍMICO, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO DE ESPÁRRAGO ESCALDADO	68
1 Parámetros fisicoquímicos	68
a Firmeza	68
b Diferencia total de color	74
c Compuestos fenólicos	78
d Vitamina C	82
e Actividad enzimática de Peroxidasa	85
C MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE ESPÁRRAGO ESCALDADO	88
1 Optimización del proceso de escaldado	88
2 Validación de los modelos de predicción	89

D CONTRASTE DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS, FITOQUÍMICO, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO DE ESPÁRRAGO ESCALDADO OPTIMIZADO RESPECTO AL FRESCO	92
1 Parámetros fisicoquímicos	92
a Humedad	92
b pH	94
c Acidez titulable	94
d Sólidos solubles totales	94
e Firmeza	95
f Diferencia total de color	95
2 Parámetro fitoquímico	96
a Compuestos fenólicos	96
3 Parámetro nutricional	98
a Ácido ascórbico	98
4 Parámetro enzimático	100
a Actividad de Peroxidasas	100
E PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE ESPÁRRAGO	102
1 Conductividad térmica (k)	102
2 Capacidad calorífica específica (C_p)	104
3 Densidad aparente (ρ)	106

4 Difusividad térmica (α)	108
F COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CALOR (h)	110
G SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	114
1 Análisis con elemento finito	114
H VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN	118
VII CONCLUSIONES	122
IX BIBLIOGRAFÍA	124
ABREVIATURAS	138
ANEXOS	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
1	Planta de espárrago o esparraguera.	9
2	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de retención de firmeza (% RF) para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.	70
3	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la diferencia total de color (ΔE) para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.	75
4	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % RCF para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.	79
5	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % RAA para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.	83
6	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % RAE para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.	86

7	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de espárrago.	90
8	Conductividad térmica (k) en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura.	103
9	Capacidad calorífica específica (C_p) en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura.	105
10	Densidad aparente (ρ) en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura.	107
11	Difusividad térmica (α) en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura.	109
12	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el proceso de escaldado (75.9 °C) para las secciones: ápice, medio y base.	111
13	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el proceso de enfriamiento (4 °C) para las secciones: ápice, medio y base.	112
14	Historias de temperaturas experimentales en ápice, medio y base de espárrago durante el escaldado (75.9 °C) e hidrogenfriado (4 °C).	115

15	Modelo tridimensional de las secciones ápice, medio y base de espárrago mediante el Método de Elemento Finito (MEF).	116
16	Perfiles de temperatura de las secciones: ápice (3 y 15 s), medio (60 y 90 s) y base (375 y 720 s) de espárrago, utilizando el Método de Elemento Finito (MEF).	117
17	Historias de temperatura estimadas en ápice, medio y base de espárrago empleando el Método de Elemento Finito (MEF).	119

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
1	Composición nutrimental de espárrago fresco por cada 100 g de porción comestible.	11
2	Producción mundial de espárrago durante el año 2017.	13
3	Entidades con mayor producción de espárrago durante el año 2017.	14
4	Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización del proceso de escaldado.	58
5	Caracterización fisicoquímica de espárrago fresco.	62
6	Caracterización fitoquímica de espárrago fresco.	65
7	Caracterización nutrimental de espárrago fresco.	67
8	Caracterización enzimática de espárrago fresco.	69
9	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en espárrago escaldado.	91
10	Comparación de los parámetros fisicoquímicos de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.	93

11	Comparación del parámetro fitoquímico de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.	97
12	Comparación del parámetro nutrimental de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.	99
13	Comparación del parámetro enzimático de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.	101

I RESUMEN

El espárrago (*Asparagus officinalis* L.) es una hortaliza muy valorada debido a sus cualidades, esto ha hecho que su demanda haya manifestado un incremento a nivel mundial. Sin embargo, su elevada velocidad de respiración lo convierte en una hortaliza con una corta vida de anaquel que requiere ser procesado para reducir su rápido perecimiento. El escaldado se utiliza principalmente para inactivar las enzimas que causan deterioro. El objetivo de este estudio fue simular la transferencia de calor en turiones de espárrago durante el escaldado, y evaluar el impacto que este proceso tiene sobre atributos de calidad. Turiones de espárrago fresco fueron caracterizados físicoquímica [humedad (termogravimetría), pH (potenciometría), acidez titulable (titulación), sólidos solubles totales (refractometría), firmeza (técnica de punción) y diferencia total de color (colorimetría)], fitoquímica (fenólicos), nutrimental (Vitamina C) y enzimáticamente (Peroxidasa), estos últimos tres por espectrofotometría. Las variables de proceso fueron: temperatura (50 a 90 °C) y tiempo (2 a 6 min). Las condiciones de escaldado se obtuvieron de un diseño experimental Central Compuesto Rotable. Las variables de respuesta fueron retención de firmeza (% *RF*), diferencia total de color (ΔE), retención de compuestos fenólicos (% *RCF*), retención de ácido ascórbico (% *RAA*) y retención de actividad enzimática (% *RAE*). Las respuestas deseables en la optimización fueron: mayor % *RF*, % *RCF* y % *RAA*, así como menor ΔE y % *RAE*. Se evaluaron los parámetros de calidad en espárrago escaldado bajo condiciones óptimas y se compararon con el fresco. Al espárrago escaldado se le determinaron las propiedades termofísicas a 20, 40, 60 y 80 °C: conductividad térmica (k , fuente lineal de calor), capacidad calorífica específica (C_p , definición de α), densidad

aparente (ρ , desplazamiento de volumen) y difusividad térmica (α , fuente lineal de calor), así como el coeficiente convectivo (h , parámetros concentrados) en el escaldado (75.9 °C, 2.1 min) e hidrogenfriado (4 °C, 2 min). Se estimaron historias de temperatura analíticamente para geometría cilíndrica empleando propiedades termofísicas constantes y mediante el Método de Elemento Finito (MEF) con propiedades en función de la temperatura. Las condiciones óptimas fueron 75.9 °C y 2.1 min. Las respuestas óptimas fueron % $RF = 85.3$, $\Delta E = 10.3$, % $RCF = 44.6$, % $RAA = 41.2$ y % $RAE = 20.6$. La deseabilidad global fue 0.631. Los parámetros de calidad en espárrago escaldado en condiciones óptimas fueron diferentes respecto al fresco, excepto en humedad. Para las secciones ápice, medio y base, k varió desde 0.475 a 0.600, 0.448 a 0.542 y 0.433 a 0.583 $W m^{-1} K^{-1}$, C_p desde 3120 a 3924, 3143 a 3508 y 3322 a 3805 en $J kg^{-1} K^{-1}$, ρ en el rango de 989 a 1250, 1003 a 1182 y 889 a 1093 en $kg m^{-3}$ y α de 1.22×10^{-7} a 1.54×10^{-7} , 1.30×10^{-7} a 1.42×10^{-7} y 1.39×10^{-7} a $1.46 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. El coeficiente convectivo para el escaldado en las secciones ápice, medio y base fue de 394 ± 43 , 507 ± 26 y $590 \pm 83 W m^{-2} K^{-1}$ y para enfriamiento 225 ± 68 , 329 ± 63 y 458 ± 26 en $W m^{-2} K^{-1}$, respectivamente. Los coeficientes de determinación (R^2) entre las historias de temperaturas simuladas y experimentales fueron superiores a 0.96, 0.98 y 0.99 en ápice, medio y base, respectivamente: los mayores coeficientes R^2 fueron obtenidos mediante MEF. Se obtuvieron las condiciones óptimas de temperatura y tiempo para el escaldado de espárrago con el fin de obtener mejores valores de los parámetros de calidad y se predijo de manera satisfactoria las historias de temperatura en espárrago.

ABSTRACT

The asparagus (*Asparagus officinalis* L.) is a highly valued vegetable due to its quality attributes, this has meant that its demand has manifested an increase worldwide. However, its high respiration rate makes it a vegetable with a short shelf life that needs to be processed to slow down its perishing. Blanching is mainly used to inactivate enzymes that cause deterioration. The objective of this study was to simulate the heat transfer in asparagus turions during blanching, and evaluate the impact that this process has on quality attributes. Fresh asparagus turions were physiochemically [moisture (thermogravimetry), pH (potentiometry), titratable acidity (titration), total soluble solids (refractometry), firmness (puncture technique), and total color difference (colorimetry)], phytochemically (phenolic compounds), nutritionally (Vitamin C), and enzymatically (Peroxidase) characterized, the latter three by spectrophotometry. The process variables were: temperature (50 to 90 °C) and time (2 to 6 min). The blanching conditions were obtained from a rotatable central composite design. The response variables were firmness retention (% *FR*), total color difference (ΔE), phenolic compounds retention (% *PCR*), ascorbic acid retention (% *AAR*), and enzymatic activity retention (% *EAR*). The desirable responses in the optimization were: higher % *FR*, % *PCR*, and % *AAR*; as well as lower ΔE and % *EAR*. Quality parameters were evaluated in blanched asparagus under optimal conditions and compared with fresh ones. The thermophysical properties at 20, 40, 60, and 80 °C were determined to the blanched asparagus: thermal conductivity (k , linear heat source), specific heat capacity (C_p , definition of α), bulk density (ρ , volume displacement) and thermal diffusivity (α , linear heat source), as well as the convective coefficient (h , lumped-capacity) during blanching (75.9 °C, 2.1 min) and hydrocooling (4 °C, 2 min). Temperature histories

were analytically estimated for cylindrical geometry using constant thermophysical properties and with the Finite Element Method (FEM) with temperature-dependent properties. The optimal conditions were 75.9 °C and 2.1 min. The optimal responses were % $FR = 85.3$, $\Delta E = 10.3$, % $PCR = 44.6$ %, $AAR = 41.2$, and % $EAR = 20.6$. The overall desirability was 0.631. The quality parameters in blanched asparagus at optimal conditions were different from the fresh ones, except for moisture. For the apex, middle, and base sections, k ranged from 0.475 to 0.600, 0.448 to 0.542, and 0.433 to 0.583 $W m^{-1} K^{-1}$, C_p from 3120 to 3924, 3143 to 3508, and 3322 to 3805 $J kg^{-1} K^{-1}$, ρ in the range from 989 to 1250, 1003 to 1182, and 889 to 1093 $kg m^{-3}$, and α from 1.22×10^{-7} to 1.54×10^{-7} , 1.30×10^{-7} to 1.42×10^{-7} , and 1.39×10^{-7} to $1.46 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$. The convective coefficient for the apex, middle, and base sections during blanching was 394 ± 43 , 507 ± 26 , and $590 \pm 83 W m^{-2} K^{-1}$; and for cooling 225 ± 68 , 329 ± 63 , and $458 \pm 26 W m^{-2} K^{-1}$, respectively. The determination coefficients (R^2) between simulated and experimental temperature histories were higher than 0.96, 0.98, and 0.99 at apex, middle, and base, respectively: the highest R^2 coefficients were obtained by FEM. The optimum temperature and time conditions for blanching of asparagus were obtained in order to achieve better values of the quality parameters and the temperature histories for asparagus were satisfactorily predicted.

II INTRODUCCIÓN

Reconocido como uno de los vegetales más saludable, por ser bajo en calorías y representar una rica fuente de compuestos bioactivos, el espárrago (*Asparagus officinalis* L.), se ha posicionado entre los vegetales más consumidos alrededor del mundo. Este vegetal posee una alta capacidad antioxidante y su consumo representa diversos beneficios para la salud de las personas, pues su consumo disminuye el riesgo de contraer enfermedades degenerativas y ciertos tipos de cáncer, debido a la reducción del estrés oxidativo y la inhibición de la oxidación de macromoléculas (Soobrattee y col 2005). Sin embargo, esta hortaliza es un producto altamente perecedero a causa de su alta tasa respiratoria, actividad que continúa después de la cosecha. Además, es común procesarlo con el fin de reducir las pérdidas poscosecha y ampliar su disponibilidad en épocas del año en las cuales no se cosecha.

El escaldado es uno de muchos procesos que tienen lugar durante la preparación de vegetales crudos para la aplicación de procesos de conservación como enlatado, secado y congelado. Para obtener un tratamiento térmico eficiente debe considerarse que los productos vegetales, fuente de nutrimentos, no se sobreescalden; puesto que resulta en una excesiva lixiviación de minerales, pigmentos, vitaminas así como pérdida de sabor y textura.

Actualmente la industria alimentaria sufre la necesidad de maximizar la eficiencia de los procesos térmicos (escaldado, cocción, pasteurización, esterilización, etc.) para optimizar la calidad del producto final, lo que ha provocado un creciente interés en la aplicación de modelos computacionales capaces de simular el fenómeno de

conducción de calor en productos alimenticios sólidos presente en los procesos térmicos.

Las exigencias actuales de diseño de procesos térmicos exigen a los ingenieros obtener soluciones en tiempos reducidos, por lo que surge la necesidad de buscar soluciones aproximadas que puedan obtenerse fácilmente en un tiempo reducido y con un esfuerzo pertinente.

Las soluciones a las ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos de transferencia de calor por conducción proporcionan una solución aproximada al problema físico real. Sin embargo, geometrías complejas, propiedades que varían dependientes de la temperatura durante el proceso y las condiciones de frontera, que se manifiestan en la mayoría de los productos alimenticios y procesos térmicos, significan que no es posible obtener una solución a no ser que se hagan simplificaciones al problema físico y tales simplificaciones merman la exactitud de las predicciones realizadas con estos modelos.

El Método de Elemento Finito (MEF) es uno de los métodos numéricos empleados actualmente en el campo de la ingeniería aplicada para la obtención de soluciones aproximadas (Rodríguez 2005).

Por lo anterior, se busca optimizar los procesos para lograr la máxima retención de las características del producto fresco. Además, el conseguir adecuadas simulaciones del proceso de transferencia de calor durante el escaldado e hidrogenfriado de alimentos con formas irregulares permite mejorar el diseño de equipos, minimizar costos energéticos al disminuir corridas experimentales y reducir la inversión de tiempo

excesivo para llegar a determinar las condiciones óptimas de trabajo que minimicen las pérdidas nutricionales y sensoriales.

En la presente investigación se optimizaron las condiciones de escaldado de espárrago (*Asparagus officinalis* L.) con base en los parámetros de calidad y se simuló la transferencia de calor durante el proceso.

III REVISIÓN DE LA LITERATURA

A ESPÁRRAGO

1 Generalidades

El espárrago (*Asparagus officinalis* L.) es conocido y cultivado desde épocas antiguas, evidencias señalan su origen en la región oriental del Mediterráneo y Asia menor (Ornstrup 1997).

El espárrago es una planta vivaz, que puede permanecer en el suelo por varios años, y cuya parte aprovechable son las yemas de los tallos denominados turiones (Millán 2014). El espárrago crece en climas templados y subtropicales, siendo la única especie de su género cultivada como hortaliza (Ornstrup 1997).

La planta de espárrago, o esparraguera (**Figura 1**), está conformada por una parte subterránea, compuesta por un rizoma y el sistema radical, que en conjunto forman lo que se denomina corona, y una parte aérea compuesta de tallos erectos, ramas y hojas modificadas, que constituyen el helecho; sobre éste se desarrollan las flores y frutos (Del Pozo y González 1999).

El rizoma es un tallo modificado que actúa como unión entre el sistema radical y la parte aérea de la planta. En el rizoma se forman, además, grupos de yemas vegetativas ubicadas en el ápice de crecimiento, de donde se desarrollan los turiones o espárragos.

2 Valor nutrimental

El espárrago (*Asparagus officinalis* L.) es uno de los vegetales más saludables, bajo en calorías y representa una rica fuente de compuestos fitoquímicos bioactivos, particularmente antioxidantes como ácido ascórbico, flavonoides (principalmente



Figura 1. Planta de espárrago o esparraguera.

rutina y quercitina) y otros compuestos fenólicos (Yang y col 2017). Los espárragos frescos están constituidos sobre todo por agua. Su contenido en azúcares y grasas es muy bajo, mientras que son una de las hortalizas más ricas en proteínas.

En relación con su contenido vitamínico, destaca la presencia de folatos, provitamina A y vitaminas C y E. A excepción de los folatos, el resto cumple una importante acción antioxidante. En el **Cuadro 1** se destaca la composición nutrimental del espárrago.

Según Loayza (2006), los folatos contenidos en los espárragos tienen un efecto reductor en los síntomas de depresión. El folato tiene como función prevenir que altos niveles de homocisteína se acumulen en el cuerpo. Los altos niveles de homocisteína pueden interferir en la capacidad del cerebro de recibir nutrimentos y hormonas vitales, entre ellas serotonina y dopamina.

El consumo de espárrago puede contribuir a prevenir malformaciones congénitas, ya que los espárragos aportan cerca de una cuarta parte de la cantidad diaria de ácido fólico.

Debido a su alto contenido de fibra y agua, el consumir espárragos ayuda a prevenir el estreñimiento, garantizando que el cuerpo pueda remover efectivamente las toxinas antes de que se acumulen.

En cuanto a minerales, los espárragos presentan cantidades importantes de potasio, hierro, fósforo y yodo; además de calcio y magnesio, aunque en menor proporción. Este considerable contenido de potasio, y bajas cantidades de sodio, le confieren una acción diurética que favorece la eliminación del exceso de líquido del organismo.

Cuadro 1. Composición nutrimental de espárrago fresco por cada 100 g de porción comestible.

COMPOSICIÓN	CANTIDAD
Agua	93.22 g
Energía	20 kcal
Proteína	2.2 g
Grasa	0.12 g
Carbohidratos	3.88 g
Fibra	2.1 g
Azúcares	1.88 g
Calcio	24 mg
Hierro	2.14 mg
Magnesio	14 mg
Fósforo	52 mg
Potasio	202 mg
Sodio	2 mg
Zinc	0.54 mg
Vitamina C	5.6 mg
Tiamina (Vitamina B1)	0.143 mg
Riboflavina (Vitamina B2)	0.141 mg
Niacina (Vitamina B3)	0.978 mg
Vitamina B6	0.091 mg
Folato	52 µg
Vitamina A	38 µg
Vitamina E	1.13 mg
Vitamina K	41.6 µg

Fuente: USDA 2016

Por su alto contenido de glutatión, saponinas y folatos, los espárragos ayudan a afrontar el cáncer. Además, los espárragos son una rica fuente de flavonoides, especialmente de rutina, un potente antioxidante, que protege de los rayos ultravioleta, de la contaminación por metales tóxicos y de numerosas sustancias químicas presentes hoy en los alimentos. Asimismo, inhiben la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL) y tienen efectos antiinflamatorios y antialérgicos.

3 Producción

a Mundial

En 2017 se produjeron a nivel mundial 8,950,306 toneladas de espárrago. En el **Cuadro 2** se muestran los principales 10 países productores de espárrago en el mundo durante el año 2017. China fue el principal productor con 7,843,162 toneladas. México se posicionó en el tercer lugar con una producción total de 245,681 toneladas (FAOSTAT 2017).

b Nacional

El cultivo de espárrago en México inició a finales de los años 80's. En el año 2017 en el país existían 27,409 hectáreas destinadas al cultivo de espárrago, distribuidas en 15 entidades del país, siendo las más importantes, por la superficie sembrada, los estados de Sonora, Guanajuato, Baja California, Baja California Sur, y Querétaro, que representaban el 97 % de la superficie con este cultivo (SIAP 2020).

El resto de las entidades donde también se cultivan espárragos son Aguascalientes, Coahuila, Estado de México, Michoacán, San Luis Potosí, Sinaloa, Tlaxcala y Zacatecas (SAGARPA 2020). Las 10 entidades del país con mayor producción de espárrago se muestran en el **Cuadro 3**.

Cuadro 2. Producción mundial de espárrago durante el año 2017.

País	Producción (t)
China	7,843,162
Perú	383,098
México	245,681
Alemania	130,881
España	63,433
Italia	46,419
EEUU	34,100
Japón	29,981
Tailandia	25,000
Países Bajos	20,800

Fuente: FAOSTAT 2020.

Cuadro 3. Entidades con mayor producción de espárrago durante el año 2017.

Estado	Producción (t)
Sonora	146,743
Guanajuato	33,219
Baja California	31,297
Baja California Sur	24,132
Querétaro	6,231
Michoacán	1,753
Durango	660
Sinaloa	365
Zacatecas	270
Jalisco	262

Fuente: SIAP 2020.

La producción de esta hortaliza crece 22.9 % en 2017 respecto al año anterior, debido a un incremento tanto en el volumen obtenido, como en el precio al productor. México es el país que más espárrago exporta en el mundo. En 2017, 65 % de la producción mexicana se destinó a la exportación, siendo Estados Unidos el principal destino (SAGARPA 2020).

4 Manejo poscosecha

Las temperaturas indicadas para mantener un tiempo de vida útil prolongado en el espárrago verde varían entre 0 y 2 °C.

La humedad relativa alta (95 a 100 %) es esencial para prevenir la desecación y la pérdida de apariencia brillante.

Las temperaturas bajas pueden causar daño por frío por lo cual se recomienda exponer a frío suave o ligero.

La vida de almacenamiento de esta hortaliza varía típicamente de 10 a 21 días a 2 °C y puede extenderse hasta por 30 días si se almacena en atmósfera modificada por 7 a 10 días. El almacenamiento prolongado (10 a 12 días) en aire a 0 °C puede causar daño por frío (Cantwell 2013).

B ESCALDADO

1 Generalidades

El escaldado es una operación unitaria en el procesamiento de vegetales que consiste en la inmersión del vegetal en agua a temperatura cercana a la de ebullición, durante un tiempo breve, con el objetivo principal de inactivar enzimas indeseables. Este tratamiento térmico incrementa la estabilidad de los vegetales durante largos

periodos de almacenamiento, cuando se congelan o se someten a otros procesos. El tiempo de escaldado a temperatura cercana a la de ebullición se establece de acuerdo con la estabilidad térmica de la enzima que se desea inactivar y el efecto que el calor ejerce sobre la textura del vegetal (Aguilar y col 1999).

El tiempo requerido para el escaldado depende del tiempo necesario para la inactivación principalmente de las enzimas peroxidasa y polifenoloxidasas (Aguilar y col 1999).

La Peroxidasa es comúnmente usada como un indicador de la efectividad del proceso de escaldado de frutas y hortalizas debido a su presencia en la mayoría de los tejidos vegetales y a su estabilidad térmica, además de su simple cuantificación (Zheng y Lu 2011).

2 Propósitos del escaldado

El principal objetivo de aplicar el proceso de escaldado a frutas y hortalizas es conseguir la inactivación de enzimas, las cuales catalizan reacciones que provocan el deterioro de los tejidos durante el transporte, almacenamiento y procesamiento. Estas reacciones de deterioro contribuyen al desarrollo de sabores desagradables, olores, color y textura indeseables, así como descomposición de nutrimentos. Además, al escaldar se consigue la destrucción de microorganismos que contaminan al producto (Dorantes-Álvarez y col 2011).

Otro fin buscado al escaldar es el de mejorar las tasas de deshidratación y la calidad de productos deshidratados. El escaldado es un factor que influye, además de las condiciones de secado, la calidad y la velocidad del secado. Generalmente algunas frutas y hortalizas se encuentran recubiertas por una capa cerosa natural la

cual dificulta el transporte de humedad durante el secado. El escaldado incrementa la velocidad de secado al modificar las propiedades físicas del producto, lo que también puede mejorar sus atributos de calidad. Esta mejora en la calidad es una consecuencia del aumento en la permeabilidad de las membranas celulares, que a su vez aumenta la tasa de eliminación de humedad (Severini y col 2005).

Los pesticidas que se usan comúnmente en la agricultura permanecen en los productos agrícolas y su presencia amenaza la salud humana con efectos tóxicos que varían desde enfermedades leves hasta graves como el cáncer. El escaldado juega un papel importante en la reducción de los residuos de pesticidas en frutas y hortalizas. Esta reducción puede deberse a la degradación de las sustancias tóxicas o al lavado y lixiviación de las toxinas en el agua de proceso (Claeys y col 2011).

Otro aspecto importante del escaldado es la eliminación del aire intercelular. Este es un paso esencial antes del envasado y sus beneficios incluyen: evitar la expansión del aire durante el procesamiento, reducir la tensión de los contenedores evitando así el riesgo de latas deformadas y costuras defectuosas, eliminación del oxígeno del tejido, lo cual reduce la oxidación del producto y la corrosión de los materiales utilizados en latas (Cháfer y col 2003).

Durante el procesamiento de los alimentos pueden ocurrir reacciones de oscurecimiento no enzimático, especialmente la reacción de Maillard o la caramelización. O bien, reacciones que podrían provocar una pérdida de color en el producto. Estas reacciones dependen del contenido de azúcares reductores, por lo

que una disminución de estos compuestos, logrado durante el escaldado, podría disminuir el oscurecimiento y mejorar el color del producto (Hemmler y col 2018).

Para lograr la inactivación microbiana se requiere de procesos térmicos severos o tecnologías no térmicas como altas presiones, ozono, luz ultravioleta, entre otras; el escaldado también puede lograr simultáneamente la inactivación de enzimas y microorganismos. Esto podría evitar la contaminación cruzada o la recontaminación, aumentar la eficiencia energética y reducir el tiempo de procesamiento.

El escaldado también puede incrementar la eficiencia de extracción de compuestos bioactivos debido a los cambios estructurales ocasionados en los tejidos vegetales, tales como la destrucción de las membranas celulares y de las redes de hemicelulosa, celulosa y pectinas (Xu y col 2007)

3 Efecto del escaldado sobre los atributos de calidad

Los mayores daños provocados durante el procesamiento de alimentos se deben a los tratamientos térmicos.

Los cambios en la textura de frutas y hortalizas ocasionan la pérdida de firmeza de los tejidos, lo cual se contrapone a la tendencia actual de los consumidores, quienes prefieren texturas cada vez más firmes en estos productos procesados. Durante el procesamiento, cuando se aplica calor húmedo, se altera la textura de las frutas y hortalizas, principalmente por el efecto que éste ejerce sobre la pared celular. Esta estructura organizada se rompe, provoca cambios en la permeabilidad y aumenta la flexibilidad de los tejidos (Warren y Woodman 1974).

El color es una característica de los productos alimenticios que resulta afectada durante el escaldado. Por ejemplo, los carotenoides, que son los compuestos responsables de las tonalidades rojas, anaranjadas y amarillas de frutas y hortalizas. Cuando son expuestos a tratamientos térmicos ocurren diversas reacciones, tales como isomerización, oxidación y fragmentación, que promueven una pérdida del color original (Khoo y col 2011).

Estudios han demostrado que el escaldado ejerce un impacto en el valor nutrimental de frutas y hortalizas. El ácido ascórbico es considerado el constituyente nutricional más evaluado debido a la elevada susceptibilidad al calor y solubilidad que presenta. Es utilizado como un indicador de retención de nutrimentos en procesos térmicos aplicados a los alimentos.

Se ha observado que los tratamientos térmicos reducen drásticamente la actividad antioxidante. Antocianinas, fenólicos y carotenoides, entre otras moléculas, son a quienes se les atribuye esta cualidad antioxidante en frutas y hortalizas (Wachtel-Galor y col 2008).

C TRANSFERENCIA DE CALOR

1 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso en el cual se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a diferente temperatura. El calor se transmite mediante conducción, convección y radiación (Cengel 2007).

a Conducción

La conducción consiste en la transferencia de calor desde la parte más caliente a la más fría de un cuerpo por contacto molecular directo, no por movimientos de masas

de material caliente a la región fría. En estado estacionario la velocidad de transferencia de calor depende de la naturaleza del material y de las diferencias de temperatura (Levenspiel 1998). La conducción puede tener lugar en sólidos, líquidos o gases y es representada por lo que hoy se conoce como ley de la conducción de calor de Fourier, cuya forma unidimensional es:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde:

q_x = velocidad de transferencia de calor en la dirección x (W).

A = área normal a la dirección del flujo de calor (m²).

$-dT/dx$ = gradiente de temperatura en la dirección x (K m⁻¹).

k = conductividad térmica (W m⁻¹ K⁻¹).

Esta ecuación, conocida como primera ley de Fourier, para la transferencia de calor en estado estacionario permite estimar la temperatura de un material en función de la posición, es decir, los perfiles de temperatura.

b Convección

La transferencia de calor por convección se debe al movimiento de fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él. La transferencia de calor por convección se clasifica según la forma en que se genera el flujo en natural y forzada. La convección libre o natural

ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica. Pero cuando el fluido se agita mecánicamente, el calor se transfiere por convección forzada (Cengel 2007).

Cuando el fluido que rodea a un sólido tiene un movimiento convectivo natural o forzado, la velocidad de transferencia de calor del sólido al fluido, o viceversa, se expresa mediante la siguiente expresión, conocida como la ley de enfriamiento de Newton.

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

Donde:

q = velocidad de transferencia de calor (W).

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

A = área de transferencia (m^2).

T_s = temperatura de la superficie del sólido (K).

T_∞ = temperatura del medio (K).

El coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), depende de la geometría del sistema, de las propiedades del fluido, de la velocidad de flujo y de la diferencia de temperaturas (Geankoplis 2006).

c Radiación

La radiación se distingue de la conducción y la convección por el hecho de que no requiere un medio físico para la transferencia. La radiación es la transferencia de energía a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Este mecanismo se rige por las mismas leyes que dictan el comportamiento de la transferencia de luz. La radiación resulta más relevante en la transferencia a través del espacio o de gases, esto porque los sólidos y los líquidos tienden a absorber la radiación que está siendo transferida a través de ellos (Geankoplis 2006).

2 Transferencia de calor por conducción en estado inestable

Los procesos de transferencia de calor se pueden analizar desde dos puntos de vista. El primero se da cuando la temperatura y el flujo de calor en un punto son constantes con respecto al tiempo, a este proceso se le denomina transferencia de calor en estado estacionario o estable, en cambio, si la temperatura en algún punto específico cambia con el tiempo se trata de un proceso en estado inestable o no estacionario.

Antes de que un proceso llegue a tener condiciones en estado estacionario, debe transcurrir cierto tiempo después de iniciarse la transferencia de calor, para permitir que desaparezcan las condiciones de 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. En el procesamiento de alimentos, por ejemplo, los alimentos perecederos enlatados se calientan por inmersión en baños de vapor o se enfrían sumergiéndolos en agua fría (Geankoplis 2006).

a Ecuación general de conducción en estado inestable

La ecuación general de conducción en estado no estacionario en una dirección es deducida a partir de la ecuación (3). Supóngase una conducción de calor en la dirección x en un cubo de dimensiones Δx , Δy y Δz . Si los flujos de calor de entrada y de salida son realizados por conducción entonces el calor que entra está dado por la ecuación:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

El término $\partial T/\partial x$ representa la derivada parcial de T con respecto a x , con las demás variables y , z y el tiempo manteniéndose constantes.

$$\left(\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{entrada de calor} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{generación de calor} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{salida de calor} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{acumulación de calor} \end{array} \right) \quad (4)$$

La velocidad de entrada de calor a un elemento volumen es:

$$\left(\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{entrada de calor} \end{array} \right) = q_x|_x = -k(\Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \quad (5)$$

Además,

$$\left(\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{salida de calor} \end{array} \right) = q_x|_{x+\Delta x} = -k(\Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \quad (6)$$

La velocidad de acumulación de calor en el volumen Δx , Δy y Δz en el tiempo dt es,

$$\left(\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{acumulación de calor} \end{array} \right) = (\Delta x \Delta y \Delta z) \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

La velocidad de generación de calor en el volumen Δx , Δy y Δz es,

$$\left(\begin{array}{c} \text{velocidad de} \\ \text{generación de calor} \end{array} \right) = (\Delta x \Delta y \Delta z) \dot{q} \quad (8)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5), (6), (7) y (8) en la (4) y dividiendo entre Δx , Δy y Δz se obtiene:

$$\dot{q} + \frac{k \left(\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} \right)}{\Delta x} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

Cuando Δx tiende a cero, se obtiene la segunda derivada parcial de T con respecto a x . Reordenando la expresión,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} \quad (10)$$

Donde:

$$\alpha = k/\rho C_p$$

Para la conducción en tres dimensiones, una deducción similar produce la siguiente expresión,

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

En muchos casos ocurre la conducción de calor en estado no estacionario, pero la velocidad de generación de calor es cero. Entonces, las ecuaciones (10) y (11) se transforman en:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

Las ecuaciones (12) y (13) permiten estimar la temperatura T con respecto a la posición x , y , z y el tiempo t , es decir, se pueden predecir perfiles e historias de temperatura para un material.

b Transferencia de calor con resistencia interna despreciable

1) Parámetros concentrados

En algunos casos se observa que determinados cuerpos presentan una distribución uniforme de la temperatura durante el proceso de transferencia de calor. La temperatura de esos cuerpos se puede tomar sólo como una función del tiempo, $T(t)$. El análisis de la transferencia de calor que utiliza esta idealización se conoce como análisis de parámetros concentrados (Cengel 2007).

De acuerdo con la ley de Fourier, la conducción de calor en ausencia de un gradiente de temperatura implica la existencia de una conductividad térmica infinita. Esta condición es imposible. Sin embargo, aunque el supuesto nunca se satisface de manera exacta, se acerca mucho a ello si la resistencia a la conducción dentro del sólido es pequeña comparada con la resistencia a la transferencia de calor entre el sólido y sus alrededores.

Si no se toman en consideración los gradientes de temperatura dentro del sólido, ya no es posible abordar al problema con la ecuación de difusión de calor. En su lugar,

la respuesta de temperatura transitoria se determina realizando un balance global de energía en el sólido. Este balance debe relacionar la velocidad de pérdida de calor en la superficie con la rapidez de cambio de la energía interna (Incropera 1999). Dicho balance da como resultado,

$$hA(T - T_{\infty}) = -\rho C_p V \frac{dT}{dt} \quad (14)$$

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).

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

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

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

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

V = volumen del sistema (m^3).

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

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{\left(-\frac{hA}{\rho C_p V} t\right)} \quad (15)$$

Esta ecuación se utiliza a menudo para estimar el coeficiente convectivo de transferencia de calor, después de ser linealizada, a partir de datos de la historia de temperatura durante un proceso de calentamiento o enfriamiento.

c Número de Biot

El número de Biot es un número adimensional que desempeña un papel fundamental en problemas de conducción transitoria que implican efectos de convección superficial, este parámetro compara los valores relativos de resistencia interna a la conducción y resistencia convectiva superficial a la transferencia de calor (Geankoplis 2006). Se define como:

$$Biot = \frac{L_c/k}{1/h} = \frac{hL_c}{k} = \frac{\text{Resistencia a la conducción dentro del cuerpo}}{\text{Resistencia a la convección en la superficie del cuerpo}} \quad (16)$$

Donde L_c es la longitud característica que, por sencillez, se acostumbra definir como la relación entre el volumen del sólido y el área de la superficie. Esta definición de longitud característica facilita los cálculos en sólidos de forma irregular. Sin embargo, si se desea aplicar el criterio en forma prudente, L_c debe asociarse con la escala de longitud que corresponde a la diferencia máxima de temperaturas espaciales (Incropera 1999).

De acuerdo con la ecuación (16) el número de Biot proporciona una medida de la caída de temperatura en el sólido en relación con la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido. Si $Bi \leq 0.1$, la resistencia a la conducción dentro del sólido es mucho menor que la resistencia a la convección a través de la capa límite del fluido. En consecuencia, es razonable la suposición de una distribución de temperaturas

uniforme y, por lo tanto, la temperatura en el interior de un cuerpo es una función del tiempo (Manrique 2002).

d Transferencia de calor con resistencia interna y externa finitas

En situaciones donde la resistencia interna es importante se pueden apreciar gradientes de temperatura dentro del cuerpo. En dicho caso, la temperatura es una función de la posición y el tiempo, $T(x,t)$, y el método de parámetros concentrados no resulta adecuado por lo que deberán usarse métodos alternativos.

Los problemas de conducción transitoria se describen, en su forma más general, mediante la ecuación de difusión de calor, ecuación (11). La solución a esta ecuación diferencial parcial proporciona la variación de la temperatura con el tiempo y la posición. Esta ecuación se adapta para diferentes geometrías, entre las que se encuentran placa infinita, cilindro infinito y esfera.

1) Placa infinita

La ecuación de calor unidimensional en coordenadas rectangulares, sin generación interna y con la suposición de difusividad térmica constante, se reduce a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (17)$$

Se hacen las siguientes consideraciones. Al inicio del 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 ésta 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.

Para resolver la ecuación (17) es necesario especificar una condición inicial y dos condiciones de frontera. 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).

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen} \lambda_n \cos(\lambda_n x / L)}{\lambda_n + \operatorname{sen} \lambda_n \cos \lambda_n} \exp(-\lambda_n^2 Fo) \quad (18)$$

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

2) Cilindro infinito

La ecuación de calor en coordenadas cilíndricas y propiedades termofísicas constantes se establece a continuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (19)$$

Donde $\alpha = k / (\rho C_p)$ es la difusividad térmica del cilindro. La solución de esta ecuación puede usarse para establecer la temperatura como una función de la posición radial del cilindro y el tiempo $T(r, t)$. Se hace la suposición de que al inicio del proceso, el cilindro se encuentra a una temperatura uniforme T_0 y que la temperatura del medio se mantiene a T_∞ . En cualquier instante, la simetría del perfil de temperatura requiere que no haya gradiente de temperatura en el centro del cilindro. La transferencia de calor por conducción que llegue desde el interior a la superficie del cilindro debe ser igual a la transferencia de calor por convección desde esta superficie hacia el medio. El radio del cilindro es R y la variable r se mide desde el centro. Así la condición inicial y las de frontera son:

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

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

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

La solución a este sistema es:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2BiJ_0(\lambda_n \frac{r}{R})}{(Bi^2 + \lambda_n^2)J_0(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}} \quad (20)$$

En donde los valores λ_n se obtienen de la siguiente ecuación característica $\lambda_n J_1(\lambda_n) = Bi J_0(\lambda_n)$. Además, J_0 y J_1 son las funciones de Bessel de primera clase de cero y primer orden.

3) Esfera

La ecuación de calor en coordenadas esféricas es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (21)$$

Donde $\alpha = k / (\rho C_p)$ es la difusividad térmica de la esfera. La solución de esta ecuación diferencial permite establecer la temperatura como una función de la posición dentro de la esfera y el tiempo $T(r, t)$, si las condiciones iniciales y de frontera son conocidas. Se asume que al inicio del proceso, la esfera se encuentra a una temperatura uniforme T_0 y que la temperatura del medio se mantiene a T_∞ . En cualquier instante, la simetría del perfil de temperatura requiere que no haya gradiente de temperatura en el centro de la esfera. La transferencia de calor por conducción que llegue desde el interior a la superficie de la esfera debe ser igual a la transferencia de calor por convección desde esta superficie hacia el medio. El radio de la esfera es R y la variable r se mide desde el centro. La condición inicial y las de frontera son:

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

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

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

la solución a este sistema es:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \lambda_n - \lambda_n \cos \lambda_n) \sin(\lambda_n r / R)}{\lambda_n (\lambda_n - \sin \lambda_n \cos \lambda_n) R} e^{-\lambda_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}} \quad (22)$$

En donde los valores λ_n están dados por la ecuación característica

$$\lambda_n = (1 - Bi) \tan \lambda_n.$$

D PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE HORTALIZAS

Los alimentos son sistemas complejos que, siendo de origen biológico, están sujetos a una gran variabilidad en su composición y estructura; sumado a lo anterior existen cambios en la composición que ocurren durante los procesos de la industria alimentaria, tales como, congelación, evaporación, deshidratación, etc. Esto hace que se dificulte conocer sus propiedades.

El conocimiento de variables como densidad, conductividad térmica, difusividad y capacidad calorífica específica en función de la temperatura es sumamente importante para el diseño, optimización y simulación de procesos que involucran transferencia de masa y calor. Las propiedades termofísicas de los materiales alimenticios pueden ser determinadas experimentalmente, o bien, aproximadas mediante correlaciones con base en su composición.

1 Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica de un material mide la capacidad de conducir calor (Sahin y Sumnu 2009). La importancia de la conductividad térmica en materiales alimenticios reside en su empleo para estimar la velocidad de transferencia de calor conductivo durante los procesos. Los tres factores que afectan la conductividad térmica de los alimentos son: composición, estructura y condiciones de procesamiento. El contenido de agua juega un papel importante debido a la magnitud relativa de las conductividades del agua en los alimentos. Los factores estructurales que influyen son: número y tamaño de poro, forma, distribución y disposición de diferentes fases. Los factores de procesamiento son la temperatura, la presión y el mecanismo de transferencia de calor (Sablani y Rahman 2003). Las conductividades térmicas de los materiales alimentarios varían entre la conductividad del agua ($k_{\text{agua}} = 0.614 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a 27 °C) y del aire ($k_{\text{aire}} = 0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a 27 °C), que son los componentes con mayor y menor conductividad, respectivamente, en los alimentos (Alvarado y Aguilera 2001).

2 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, la 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 (Cengel 2007).

3 Densidad (ρ)

La densidad de los alimentos sólidos puede determinarse por un método de desplazamiento, ya sea en aire o líquido (Mohsenin, 1986), cuando se emplea líquido solamente se requiere de material general de laboratorio. En este método, la muestra es sumergida en el líquido hasta cubrirla por completo, se puede determinar la cantidad 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, incluyendo sus poros internos.

4 Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica (α) 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:

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

Donde:

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

ρ = densidad (kg m^{-3})

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

Estas propiedades (k , ρ , y C_p) se pueden determinar experimentalmente y al sustituirla en la ecuación se obtiene el valor de α . En materiales con difusividades térmicas inferiores 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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (24)$$

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 1.0 y $2.36 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Vidaurre y Castañeda 2014).

E SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ALIMENTOS

1 Generalidades

La simulación consiste en construir modelos informáticos que describen la parte esencial del comportamiento de un sistema de interés, así como en diseñar y realizar experimentos con tales modelos con el fin de extraer conclusiones de sus resultados para apoyar la toma de decisiones. Típicamente, se utiliza en el análisis de sistemas tan complejos que no es posible su tratamiento analítico o mediante análisis numérico (Ríos y col 2000).

2 Ventajas de los modelos de simulación

Entre sus ventajas podemos mencionar la rapidez con la que es posible manipular el modelo ya construido para analizar diferentes escenarios. Generalmente, resulta más barato mejorar el sistema vía simulación que hacerlo directamente sobre el sistema real; además, los métodos de simulación son más ilustrativos que los métodos puramente analíticos. Los modelos de simulación permiten abordar problemas de mayor complejidad o con mayor detalle y proporcionar resultados más exactos que los métodos analíticos. Lo anterior se debe a que los métodos analíticos se desarrollan casi siempre para sistemas relativamente sencillos donde suele hacerse un gran número de suposiciones o simplificaciones que alejan al modelo matemático de la realidad. Sin embargo, los modelos de simulación también tienen algunas desventajas: resultan ser costosos y requieren mucho tiempo para desarrollarse y validarse, es necesario hacer una gran cantidad de corridas computacionales para encontrar soluciones óptimas y pueden distraer al analista y darle un falso sentido de seguridad (Azarang y García 1997).

3 Métodos numéricos para la simulación

En la simulación del fenómeno de transferencia de calor, el modelo es a menudo un conjunto de ecuaciones cuya solución analítica es complicada, principalmente cuando la geometría del sistema es irregular, en estos casos se puede utilizar métodos numéricos.

a Análisis con elemento finito

El método del elemento finito es una técnica numérica para resolver problemas que se pueden describir por ecuaciones diferenciales parciales o que pueden ser formuladas por medio de una minimización de una función. El método de elemento finito es una herramienta de análisis muy poderosa que permite obtener soluciones aproximadas en una amplia variedad de problemas.

La premisa básica es que una región de solución puede ser modelada analíticamente reemplazándola con un arreglo de elementos discretos. Esto permite reducir un número infinito de incógnitas del problema a uno con un número finito de incógnitas.

El análisis con elemento finito presenta algunas ventajas cuando se compara con los métodos de diferencias finitas, algunas de ellas son:

- La variación de las propiedades del sistema puede manipularse con facilidad.
- Las regiones irregulares de un material pueden ser modeladas con precisión.
- Los problemas con condiciones de frontera mixtas son fáciles de simular.

- Los problemas que involucran diferentes tipos de materiales se pueden resolver más fácilmente.
- Es más adecuado para situaciones no lineales.
- Se puede modificar el tamaño y el número de elementos que conforman un sistema.

IV JUSTIFICACIÓN

Actualmente la sociedad no solo requiere alimentos con buen sabor, sino que además demandan alimentos con calidad y con diferentes aportes y beneficios a la salud.

El espárrago posee propiedades nutricionales, antioxidantes y sensoriales que lo convierten en un alimento idóneo para consumo. En 2017 México se ubicó en el tercer lugar como productor de espárrago y obtuvo el primer lugar como exportador de espárrago fresco (FAOSTAT 2020).

Su elevada velocidad de respiración hace que este vegetal tenga un periodo de vida de anaquel muy corto, por lo que su procesamiento ayuda a alargar la fecha de caducidad de este producto. El proceso de escaldado, que se aplica antes de otros procesos como congelado o enlatado, tiene un efecto sobre las cualidades que el espárrago posee.

La simulación de procesos en la industria ofrece ventajas sobre la realización de experimentos para conocer el comportamiento de determinadas variables de respuesta, principalmente un menor gasto de recursos. Además, no existen estudios previos que consideren la variación de las propiedades termofísicas en función de la temperatura.

Con base en lo anterior, el presente trabajo se enfocó en optimizar el proceso de escaldado de espárragos en función del tiempo y temperatura de escaldado. Y se evaluó el efecto del tratamiento provocado sobre algunos parámetros de calidad.

El estudio del proceso de escaldado permitirá incrementar las formas de industrialización y comercialización del espárrago, debido a que este proceso térmico se utiliza como etapa previa a los procesos de congelación, secado y esterilización.

V HIPÓTESIS

La simulación de transferencia de calor en turiones de espárrago (*Asparagus officinalis* L.) bajo condiciones optimizadas es una herramienta adecuada para comprender el efecto que el proceso térmico ejerce sobre atributos fisicoquímicos, fitoquímicos, nutrimentales y enzimáticos.

VI OBJETIVOS

A OBJETIVO GENERAL

Optimizar las condiciones (tiempo-temperatura) en el escaldado de espárrago (*Asparagus Officinalis* L.) con base en los parámetros de calidad y simular la transferencia de calor durante el proceso.

B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización fisicoquímica (humedad, pH, acidez titulable, sólidos solubles totales, firmeza y color), fitoquímica (compuestos fenólicos), nutrimental (Vitamina C) y enzimática (Peroxidasa) de turiones de espárrago fresco.

2. Llevar a cabo el escaldado de turiones de espárrago a diferentes condiciones de temperatura y tiempo de acuerdo al diseño de experimentos.

3. Encontrar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de escaldado de turiones de espárrago, con base en firmeza, diferencia total de color, compuestos fenólicos, Vitamina C y actividad de la Peroxidasa.

4. Comparar los parámetros fisicoquímicos, fitoquímico, nutrimental, y enzimático de espárrago fresco respecto al escaldado optimizado.

5. Determinar las propiedades termofísicas (conductividad térmica, difusividad y densidad aparente) de tallos de espárrago a diferentes temperaturas y evaluar el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

6. Simular la transferencia de calor en las condiciones óptimas de escaldado de turiones de espárrago.

VII MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

1 Materia prima

Para la realización de este proyecto se utilizó espárrago (*Asparagus officinalis* L.) obtenido de un mercado local de la ciudad de Culiacán, Sinaloa. La elección de los espárragos se llevó a cabo tomando en cuenta forma y tamaño uniformes, libres de defectos, firmes y de un color verde intenso.

Los espárragos fueron lavados, con una solución de 200 ppm de hipoclorito de sodio, eliminado el exceso de agua y almacenados en refrigeración hasta su posterior uso.

B MÉTODOS

1 Escaldado tradicional

El proceso de escaldado fue realizado por inmersión de los turiones en agua a diferentes temperaturas (50 a 90 °C) y tiempos (2 a 6 min). Se utilizó un baño termostático (modelo 9500, Fisher Scientific, EUA) con una precisión de temperatura de ± 0.1 °C. Una vez escaldados, los espárragos fueron transferidos a un baño de agua-hielo a temperatura ≤ 4 °C con el fin de someterlos a choque térmico (Pinchao y col 2016).

2 Parámetros fisicoquímicos

Las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos se realizaron en tres secciones diferentes del espárrago: ápice, medio y base.

a Humedad

El contenido de humedad se determinó empleando el método termogravimétrico 972.2 descrito por la AOAC (2012). El método se basa en desecar la muestra en una estufa de aire forzado hasta no observar cambios de masa. La cuantificación de la pérdida de masa determina el contenido de humedad en la muestra.

La determinación se realizó por triplicado. Se colocaron tres cápsulas de porcelana en una estufa (Felisa, Modelo FE-292D, México) por 24 horas a 100 °C para conseguir masa constante (m_{cc}). Se pesaron 1.5 g de muestra fresca (m_{mf}) junto con la cápsula de porcelana utilizando una balanza analítica (Sartorius, TE15025, EUA), posteriormente se secaron en la estufa durante 24 horas a 100 °C. Una vez pasado el tiempo de secado por convección se dejaron enfriar a temperatura ambiente por 30 min en un desecador. Después se determinó la masa de la muestra seca (m_{ms}) calculando el contenido de humedad con la siguiente ecuación:

$$Humedad(\%) = \frac{m_{mf} - (m_{ms} - m_{cc})}{m_{mf}} (100) \quad (25)$$

Donde:

m_{mf} = masa de la muestra fresca (g).

m_{cc} = masa constante de la cápsula (g).

m_{ms} = masa del recipiente con la muestra seca (g).

b pH

Para la medición del pH se siguió el procedimiento descrito en la técnica 981.12 de la AOAC (2012), que consistió en usar 5 g de cada sección: ápice, medio y base. Se homogenizaron las muestras con 50 mL de agua destilada neutra (pH = 7), posteriormente se filtró y se tomó una alícuota de 20 mL. Se utilizó un potenciómetro digital (Orion 420-A, EUA) previamente calibrado a pH 4 y 7.

c Acidez titulable

Se llevó a cabo de acuerdo con el método oficial 942. 5 de la AOAC (2012), que consistió en usar 5 g de muestra, a los cuales se le añadieron 50 mL de agua destilada neutra (pH = 7), a continuación, se filtró y se tomó una alícuota de 20 mL para proceder a titular con hidróxido de sodio 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.1 ± 0.2 . Los cambios de pH fueron observados con un potenciómetro (Orion 420-A, EUA). La acidez titulable de la muestra se expresó como porcentaje de ácido cítrico que fue calculado con la siguiente ecuación:

$$AT = \frac{[(VG)(MEqA)(N)(V)]}{[(Mm)(A)]} (100) \quad (26)$$

Donde:

AT = acidez titulable (% ácido cítrico).

VG = volumen de NaOH gastado en la titulación (mL).

$MEqA$ = masa miliequivalente del ácido cítrico (g).

N = normalidad del NaOH (N).

V = volumen total de la disolución (mL).

Mm = masa de la muestra (g).

A = alícuota de la muestra (mL).

d Sólidos solubles totales

El contenido de sólidos solubles totales se determinó mediante refractometría de acuerdo al método 932.12 de la AOAC (2012). Para ello, se maceró la muestra de espárrago. Se tomaron unas gotas del jugo extraído y se colocaron en un refractómetro tipo Abbe (Sper Scientific 300001, China). El contenido de sólidos solubles totales (SST) se reporta como porcentaje de azúcar ($^{\circ}$ Brix).

e Firmeza

Para la evaluación de firmeza se siguió la metodología descrita por Marangoni y col (1995) con algunas modificaciones. Se utilizó un medidor de textura (E-DFE 100, Chatillon Ametek, North California, EUA) con una punta plana de 1.1 mm de diámetro, profundidad de 5 mm y a una velocidad de penetración constante de 50 mm/min. Las mediciones se realizaron en tres diferentes partes del turión, a 3, 10 y 18 cm de la base. Se realizaron tres réplicas para cada tratamiento.

f Diferencia total de color (ΔE)

Para la medición de la diferencia total de color se empleó la metodología de Yam y Papadakis (2004) con modificaciones. Los espárragos frescos y los obtenidos en cada tratamiento se colocaron sobre una superficie color blanco y se realizaron 3 mediciones en tres puntos diferentes del turión: 3, 10 y 18 cm de la base. La medición de los parámetros L^* , a^* y b^* se llevó a cabo con un colorímetro triestímulo (Minolta,

Chromameter CR-200, Osaka, Japón). Se realizaron cinco disparos sobre la superficie de cada muestra, tanto de espárrago fresco como en espárrago escaldado. La calibración del equipo consistió en hacer tres disparos sobre la carta de color blanco estándar con parámetros predefinidos de $Y = 93.50$, $x = 0.3139$ y $y = 0.3196$.

Los cálculos se realizaron a partir de la siguiente ecuación (Dolz 2008).

$$\Delta E = \left[(L^* - L_f^*)^2 + (a^* - a_f^*)^2 + (b^* - b_f^*)^2 \right]^{1/2} \quad (27)$$

Donde:

ΔE = diferencia total de color en espárrago.

L_f^*, a_f^*, b_f^* = parámetros de color de referencia del espárrago fresco.

L^*, a^*, b^* = parámetros de color de las muestras de espárrago escaldado.

g Compuestos fenólicos

El contenido de compuestos fenólicos se determinó utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu, usando el ácido gálico como estándar. La metodología se basa en la reacción de oxidación que ocurre entre los compuestos fenólicos y el reactivo. La intensidad de color formado es proporcional al contenido de compuestos fenólicos presentes en la muestra analizada.

Se obtuvieron extractos mezclando 1 g de espárrago y 10 mL de etanol al 80 %. La mezcla se mantuvo en agitación en un mezclador serológico (TTR-200, UNICO, EUA) durante 10 minutos, posteriormente se recuperó el solvente y se repitió el proceso tres veces más. Los 40 mL de sobrenadante recuperado fueron mezclados y

evaporados en rotavapor (Heidolph, modelo LABOROTA4011, Alemania) a 60 °C y vacío, hasta sequedad. El sedimento fue resuspendido en 2 mL de metanol al 50 %.

Para la determinación se mezclaron 125 µL del extracto, 125 µL del reactivo de Folin y 0.5 mL de agua destilada. Se agitó durante un minuto y se dejó reposar durante seis minutos. A continuación, se agregaron 1250 µL de carbonato de sodio al 7 % y 1 mL de agua destilada, se agitó 30 s y se dejó en reposo durante 90 min. Se midió la absorbancia a 760 nm colocando 2 mL de la mezcla en la celda en un espectrofotómetro (GENESYS 10uv, Thermo Electron Corporation, Madison, EUA).

Se elaboró una curva de calibración mediante un stock de ácido gálico a partir del cual se prepararon estándares a 20, 40, 60, 80 y 120 ppm. Éstos fueron medidos de la misma forma que las muestras. El resultado fue expresado como mg E.A.G. por 100 g s.s. (Moo-Huchin y col 2014).

3 Parámetro nutrimental

a Contenido de Vitamina C

Se determinó siguiendo la metodología descrita por Dürüst y col (1997). A 1 g de muestra se le agregaron 5 mL de ácido oxálico (0.4 %) y se homogenizaron en un Ultra-Turrax T25 (Janke y Kunkel, Alemania) durante 1 minuto. Posteriormente, el homogenizado se filtró a través de 4 capas de tela de organza para obtener el extracto. Para la determinación de Vitamina C se partió de una solución Stock de ácido ascórbico (1000 ppm) y se prepararon estándares a diferentes concentraciones. Se procedió a la realización de la curva determinando el cambio de absorbancia a 520 nm, para ello se determinaron una lectura L1, la cual se utilizó como blanco, y una

lectura L2 para cada muestra. Una vez obtenidas las lecturas de L1 y L2 se restaron (L1 - L2) y esta diferencia representó la absorbancia (eje "y") en el gráfico. A partir de esta curva se obtuvo la concentración de ácido ascórbico.

4 Parámetro enzimático

a Actividad de Peroxidasa

La actividad enzimática de Peroxidasa se determinó según el método descrito por Zhang y col (2005) con algunas modificaciones. Dicho método se basa en la reacción de oxidación de guayacol en presencia de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) para formar tetraguayacol, compuesto que presenta una coloración rojo ladrillo. La preparación del extracto consistió en medir 10 g de muestra, adicionar 2 g de polivinilpolipirrolidona (PVPP) y homogeneizar la mezcla empleando un ultraturrax (IKA, T18 basic S1, Alemania) a 4 °C usando 20 mL de buffer de fosfato de sodio (0.05 M, pH = 7). El extracto se agitó durante dos horas en oscuridad a 4 °C en un mezclador serológico de vaivén (UNICO, TTR-200, EUA), posteriormente se filtró y centrifugó a 11000 × g por 25 minutos a 4 °C, enseguida se tomaron 10 mL del sobrenadante. A continuación se saturó el sobrenadante con 7 g de sulfato de amonio $[(NH_4)_2SO_4]$, se mantuvo nuevamente durante 15 minutos en oscuridad a 4 °C en el mezclador serológico de vaivén (UNICO, TTR-200, EUA), posteriormente se centrifugó a 11000 × g por 25 minutos a 4 °C, se descartó el sobrenadante y el precipitado se resuspendió en 20 mL de buffer de fosfato de sodio (0.05 M, pH = 7), previamente mantenido a 4 °C.

El ensayo enzimático consistió en mezclar 2.7 mL de buffer de fosfato de sodio (0.2 M, pH = 6.5), 0.1 mL de H_2O_2 (0.1 % v/v en agua), 0.15 mL de guayacol (4 % v/v en agua) y 0.15 mL de extracto enzimático. Fueron registrados los cambios de

absorbancia a 470 nm y 25 °C durante 3 minutos en lapsos de 10 segundos en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv, Madison, EUA), tiempo en el cual la reacción responde a una ecuación lineal:

$$A = mt + b \quad (29)$$

Donde:

A = absorbancia.

m = velocidad enzimática (min^{-1}).

t = tiempo (min).

b = intercepto.

De la ecuación lineal se tomó la pendiente m y se alimentó en la siguiente ecuación (Latorre y Pantoja 2013):

$$a_v = \frac{(\Delta A / t) V_T}{\epsilon l V_{\text{Extr.}}} \quad (30)$$

Donde:

$\Delta A / t$ = pendiente (min^{-1}).

V_T = volumen total (mL).

ϵ = coeficiente de extinción ($25.5 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

l = espesor de la celda (1 cm).

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

Cada análisis de actividad de POD se realizó por triplicado a 25 °C. La retención de actividad enzimática (*RAE*), se calculó de la relación de la velocidad de formación del complejo de tetraguayacol de la enzima después del tratamiento y la velocidad de formación del complejo de tetraguayacol de la enzima sin tratamiento.

5 Determinación de propiedades termofísicas de turiones de espárrago

a Conductividad térmica (*k*)

Se determinó utilizando el método de la fuente lineal de calor (Sweat 1974) donde la temperatura de ésta se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$T - T_1 = \frac{Q_L}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) \right] \quad (32)$$

La determinación de la conductividad térmica (*k*) se llevó a cabo de acuerdo a la metodología empleada por (Murakami y col 1996). La sonda (fuente lineal de calor) se introdujo en el centro de los turiones hasta cubrir totalmente la sonda. El espárrago se equilibró a la temperatura de trabajo (50 a 90 °C) sumergiendo los turiones en agua y aislándolos con una película plástica para evitar la penetración de humedad o lixiviación. Se colocó un termopar en la parte exterior del espárrago para garantizar que no se provocó un incremento de temperatura durante la prueba y, de esta manera, cumplir con la condición para la confiabilidad del método, también se verificó que la intensidad de corriente no sufriera variaciones durante la prueba. Se utilizó una intensidad de corriente (*I*) constante de aproximadamente 150 mA, la cual se registró con un multímetro con el fin de calcular la potencia de la fuente lineal de calor. La

longitud (L) de la sonda utilizada es de 0.143 m 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 (Data acquisition system, modelo OMB-DAQ-56, Omega Company, EUA) y un software de cómputo (DaqView) para almacenar estos datos. La temperatura se registró cada 5 segundos. Se realizaron tres réplicas para cada temperatura y finalmente se llevó a cabo un análisis de regresión entre la temperatura y el logaritmo natural del tiempo para obtener la pendiente.

La conductividad térmica k se obtiene de la pendiente de la recta ajustada.

$$Pendiente = \frac{Q_L}{4\pi k} \quad (33)$$

Donde:

Q_L = calor suministrado por unidad de longitud ($W\ m^{-1}$).

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

La transferencia de calor por unidad de longitud Q_L se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q_L = \frac{I^2 R}{L} \quad (34)$$

En 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 (33).

b Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica (C_p) se obtuvo por despeje de la siguiente ecuación:

$$\alpha = k / (\rho C_p) \quad (35)$$

c Densidad aparente (ρ)

La densidad (ρ) se obtuvo de la razón masa volumen de una muestra de espárrago.

Para la determinación de la masa se utilizó una cantidad determinada de material, el cual se ambientó a las temperaturas de trabajo (50 a 90 °C) sumergiéndolo en agua a esa temperatura y cubriéndolo con película plástica. Para cada determinación se utilizaron masas de aproximadamente cinco gramos. Estas masas se midieron en una balanza analítica (Sartorius, TE15025, EUA).

El volumen fue obtenido por el método de desplazamiento de fluido (Mohsenin 1986). Se introdujo la muestra de espárrago, previamente pesada y ambientada, en una probeta de 50 mL que contenía un volumen determinado de tolueno, se registraron los volúmenes inicial y final. El volumen desplazado corresponde al volumen de la muestra.

d Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica se midió utilizando una sonda KD2 Pro (Decagon Devices, EEUU) y con las siguientes ecuaciones se llevó a cabo una regresión no lineal para conocer b_0 , y b_2 (Oladunjoye y Sanuade 2012).

$$T - T_0 = \frac{Q_L}{4\pi k} \left[b_0 kt + E_i \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \right] \quad (36)$$

$$T - T_0 = \frac{Q_L}{4\pi} \left[b_0 t + \frac{1}{k} E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) \right] \quad (37)$$

$$b_2 = \frac{r^2}{4\alpha} \quad \alpha = \frac{r^2}{4b_2} \quad (38)$$

6 Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)

El coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) se determinó usando un cuerpo de aluminio en forma de turión al cual se introdujo un termopar (Laurindo y col 2010).

La determinación del coeficiente convectivo se apoya en la teoría de un sistema de parámetros concentrados. Al someter un cuerpo pequeño, con una conductividad térmica elevada, a un proceso de transferencia de calor, calentamiento en este caso, permite hacer la consideración de que dentro del cuerpo no existen gradientes de temperatura, y por lo tanto la temperatura dentro del cuerpo es uniforme, en conclusión, se asume que ésta es una función solo del tiempo.

Se realizaron corridas emulando las condiciones reales de escaldado en un baño térmico, introduciendo el turión modelo, fabricado en aluminio, con el termopar instalado junto con espárragos alrededor. Con esto se obtuvo el comportamiento de la temperatura del modelo con el paso del tiempo. Lo que permitió conocer las variables de la ecuación (15),

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{\left(-\frac{hA}{\rho C_p V} t \right)} \quad (39)$$

Se linealizó la expresión anterior aplicando logaritmo natural a ambos miembros de la ecuación y se obtuvo lo siguiente:

$$\ln\left(\frac{T-T_{\infty}}{T_0-T_{\infty}}\right) = -\frac{hA}{\rho C_p V} t \quad (40)$$

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 m² K⁻¹).

Las propiedades termofísicas del aluminio son $\rho = 2702 \text{ kg m}^{-3}$, $k = 237 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y $C_p = 906.7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Cengel 2007).

La expresión anterior adquiere la forma general de una línea recta,

$$y = mx + b \quad (41)$$

Donde:

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

Se graficó $\ln[(T-T_{\infty})/(T_0-T_{\infty})]$ vs t , empleando los tiempos y temperaturas obtenidos del experimento, y se obtuvo la pendiente del gráfico. El coeficiente h se obtuvo por despeje de la ecuación de la pendiente.

$$h = -m \cdot \rho \cdot C_p \cdot L \quad (42)$$

7 Simulación de la transferencia de calor

Se utilizó el paquete computacional ANSYS (ANSYS/ED, versión 14.0) para simular la transferencia de calor. Primeramente, se determinó la ubicación de los puntos donde se colocaron los termopares en el interior de los turiones modelados en el simulador, las coordenadas asignadas a los termopares en el modelo deberán corresponder con la ubicación de los termopares durante el escaldado real, pues permitirá validar las predicciones hechas por el método. Se consideró un modelo geométrico tridimensional de turión de espárrago. Se implementó una red de elementos en el modelo con la distribución adecuada de los nodos para obtener una mayor precisión de los resultados. Para modelar se utilizó un elemento tetraedro de 10 nodos.

Para realizar la simulación se alimentaron al simulador las propiedades termofísicas del espárrago (conductividad térmica, densidad aparente y capacidad calorífica específica). Estas propiedades se consideraron dependientes de la temperatura. Para la simulación de la transferencia de calor por conducción se consideró una temperatura inicial uniforme en todos los nodos. En la superficie del modelo tridimensional se aplicaron las condiciones de transferencia de calor por convección, se alimentó la temperatura del medio (agua) y el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Por último, se ejecutó el programa a intervalos de 5 segundos y así se obtuvieron las historias de temperatura. Se seleccionaron los nodos de interés para obtener el listado de las temperaturas estimadas y poder llevar a cabo posteriormente la validación con datos experimentales.

8 Métodos estadísticos

a Caracterización en fresco

Para la comparación de los resultados de la caracterización fisicoquímica, fitoquímica, nutrimental y enzimática de las tres secciones del turión de espárrago en fresco, se utilizó un diseño completamente al azar donde el factor fue sección del espárrago (ápice, medio y base). Se llevaron a cabo 3 réplicas ($n = 3$) en cada segmento y para la comparación de datos de las variables de respuesta se usó la prueba de Fisher (LSD) con un $\alpha=0.05$ (nivel de significancia del 5 %) en el software estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.1.

b Diseño experimental

Se utilizó un Diseño Central Compuesto Rotable con dos factores: temperatura (50 a 90 °C) y tiempo (2 a 6 min) con cinco niveles de variación para cada factor, haciendo un total de 13 tratamientos (**Cuadro 4**) (Myers y Montgomery 1971; Montgomery y Jaime 1991).

c Optimización

Para llevar a cabo la optimización del proceso de escaldado se empleó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), que consiste en un grupo de técnicas estadísticas y matemáticas cuya finalidad es definir las relaciones entre variables de respuesta independientes. MSR define 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, esta metodología puede ajustar los resultados experimentales para generar modelos matemáticos de predicción (Baş y Boyacı 2007).

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

x_1 , codificada	x_2 , codificada	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
-1	-1	55.8	2.5
1	-1	84.1	2.5
-1	1	55.8	5.4
1	1	84.1	5.4
1.41421	0	50.0	4.0
-1.41421	0	90.0	4.0
0	1.41421	70.0	2.0
0	-1.41421	70.0	6.0
0	0	70.0	4.0
0	0	70.0	4.0
0	0	70.0	4.0
0	0	70.0	4.0
0	0	70.0	4.0
0	0	70.0	4.0

d Análisis de datos

Las condiciones óptimas de procesamiento se obtuvieron con el método numérico y la metodología reportada por Derringer y Suich (1980). Se seleccionó solo la sección que mayor efecto sufrió tras el escaldado. Las variables de respuesta utilizadas fueron: % *RF* (base), ΔE (base), % *RCF* (medio), % *RAA* (ápice) y % *RAE* (medio).

Para que un modelo de predicción sea reproducible, es necesario cumplir con cuatro condiciones: significancia del modelo $p < 0.05$, coeficiente de determinación ajustado $R_{aj}^2 > 0.8$, coeficiente de variación $C.V. < 10\%$ y prueba de falta de ajuste $p_{LOF} > 0.05$. Cuando estas condiciones se cumplen, el modelo se considera adecuado (Milán-Carrillo y col 2002; Milán-Carrillo y col 2006).

Dentro de los criterios empleados en la optimización del proceso, se consideró deseable: mayor retención de firmeza (% *RF*), menor diferencia total de color (ΔE), mayor retención de compuestos fenólicos (% *RCF*) y Vitamina C (% *RAA*), así como, menor retención de actividad de la Peroxidasa (% *RAE*).

e Validación del modelo de predicción

Se realizaron 5 réplicas de cada proceso de escaldado optimizado ($n = 5$). Se obtuvieron muestras a las cuales se les realizaron análisis fisicoquímicos, fitoquímicos, nutrimentales y enzimáticos. Las variables de respuesta fueron: firmeza, diferencia total de color, compuestos fenólicos, Vitamina C y actividad de la Peroxidasa. Se verificó que la media de cada variable de respuesta esté dentro del intervalo de confianza para los óptimos predichos por el modelo.

f Contraste del espárrago escaldado optimizado respecto al fresco

Para la comparación de los resultados de la caracterización fisicoquímica, fitoquímica, nutricional y enzimática de las tres secciones del turión de espárrago en fresco, se utilizó un diseño completamente al azar con dos factores: sección (ápice, medio y base) y condición del espárrago (fresco y escaldado optimizado). Se llevaron a cabo 3 réplicas ($n = 3$) en cada segmento y para la comparación de datos de las variables de respuesta se usó la prueba de Fisher (LSD) con un $\alpha = 0.05$ (nivel de significancia del 5 %) en el software estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.1

g Propiedades termofísicas

Se empleó un diseño completamente al azar con dos factores: temperatura (20, 40, 60 y 80 °C) y sección (ápice, medio y base); las variables de respuesta fueron: conductividad térmica, capacidad calorífica específica, densidad y difusividad térmica. Se llevaron a cabo tres replicas ($n = 3$). Para el coeficiente convectivo de transferencia de calor se realizó un análisis de estadística descriptiva, se llevaron a cabo 3 réplicas ($n = 3$) y se reporta la media y su desviación estándar.

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA, FITOQUÍMICA, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICA DE TURIONES DE ESPÁRRAGO FRESCO

1 Caracterización fisicoquímica

En el **Cuadro 5** se muestran los resultados de humedad, pH, acidez titulable, sólidos solubles totales y diferencia total de color; determinados en las secciones ápice, medio y base de turiones de espárrago fresco. La humedad en la sección apical y medio no presentaron diferencia estadística significativa, estas secciones son las que exhiben un mayor contenido de humedad con un 93.7 % y 93.6 %, respectivamente. Por otro lado, la humedad en la sección base resultó ser estadísticamente menor que en el resto de las secciones, con un 88.8 %.

Espinoza y López (2018) reporta un 93 % de humedad, que resulta ser similar al encontrado en este estudio para las secciones ápice y medio. Sin embargo, dicha humedad es superior a la determinada en la sección base de la presente investigación. Esto puede deberse a que en su estudio estos autores consideraron el turión de espárrago en su totalidad y no por secciones.

No hubo diferencia significativa entre el pH en ápice y medio. El pH en la base (pH = 6.29) fue el más bajo de las tres secciones. Villanueva y col (2005) estudiaron los cambios físicos, químicos, histológicos y microbiológicos de espárragos empacados en atmósfera modificada. Ellos emplearon para su estudio espárragos de dos temporadas diferentes. Los espárragos de la primera temporada presentaron un

Cuadro 5. Caracterización fisicoquímica de espárrago fresco.

Sección	Humedad (%)	pH	Acidez Titulable (% de ácido cítrico)	SST (°Brix)	Firmeza (N)	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
Ápice	93.7 ± 0.2 ^b	6.45 ± 0.07 ^b	0.10 ± 0.014 ^b	6.8 ± 0.7 ^b	7.9 ± 1.9 ^a	50.0 ± 2.2 ^a	-17.9 ± 1.5 ^a	29.6 ± 0.6 ^b
Medio	93.6 ± 0.3 ^b	6.59 ± 0.02 ^b	0.05 ± 0.003 ^a	5.2 ± 0.5 ^a	8.6 ± 0.6 ^a	62.9 ± 0.5 ^b	-18.0 ± 1.7 ^a	32.4 ± 1.1 ^c
Base	88.8 ± 1.5 ^a	6.29 ± 0.05 ^a	0.04 ± 0.003 ^a	5.0 ± 0.1 ^a	15.1 ± 0.4 ^b	63.6 ± 0.2 ^b	-14.5 ± 0.2 ^b	27.6 ± 0.2 ^a

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa. LSD = 1.7 %, LSD = 0.06, LSD = 0.01 % de ácido cítrico, LSD = 1.0 °Brix, LSD = 2.3 N, LSD = 2.6, LSD = 2.6, LSD = 1.5 (Fisher, $p \leq 0.05$).

pH = 6.46, mientras que los de la segunda temporada un pH = 6.15. El pH medido en esta investigación se encuentra dentro de este rango. Esta diferencia de pH es atribuida a que las muestras pertenecen a diferentes cosechas. Firpo y col (2007) describen resultados similares en su estudio de caracterización de algunas variedades de espárrago verde y espárrago blanco. En sus conclusiones aseveran que la base es la sección más ácida.

Por otro lado, la acidez titulable, expresada como porcentaje de ácido cítrico, es mayor en la sección apical, con un 0.10 %. Las secciones medio y base no presentaron diferencia significativa entre ellas, con una acidez de 0.05 %. Villanueva y col (2005) obtuvieron como resultado una acidez titulable de 0.10 y 0.07 % de ácido cítrico para espárragos de dos temporadas diferentes, dichos resultados son similares a los encontrados en el presente estudio.

Los sólidos solubles totales fueron 6.8, 5.2 y 5.0 °Brix para las secciones ápice, medio y base, respectivamente. No hubo diferencia significativa entre las secciones base y medio. Estos resultados son similares a los encontrados por Li y col (2006) quienes en un estudio sobre el almacenamiento hipobárico de espárragos verdes obtuvieron sólidos solubles totales entre 4.3 y 5.5 °Brix. De igual forma, Palma y col (2015) presentan en sus resultados un contenido de sólidos solubles de 5.2 °Brix, el cual es similar al encontrado en este estudio. Ellos explican que este aumento en la concentración de sólidos en el ápice del espárrago es un reflejo del mayor contenido de proteínas y del menor tamaño celular de esta zona, el cual, es de naturaleza meristemática.

La zona apical presentó una menor firmeza y ésta aumentó a medida que el punto de medición se acercó a la base. Las secciones ápice y medio no manifestaron diferencia estadística significativa. La zona de la base del espárrago presentó una mayor firmeza, registrando 15.1 N como fuerza máxima de compresión. Este comportamiento de mayor firmeza en la base del turión también fue descrito por Fuentealba (2004), al medir la firmeza en turiones de 10 y 13 mm de diámetro a 100 y 135 mm desde el ápice, encontró que las zonas más firmes son aquellas que se encuentran más alejadas del ápice. Lipton (1990) explica que este fenómeno se debe al mayor contenido de fibra en la zona de la base, mismo que disminuye hacia el ápice del espárrago.

En lo referente a color, solo la sección apical ($L^* = 50.0$) presentó diferencia estadística con respecto a la zona media del espárrago ($L^* = 62.9$) y la base ($L^* = 63.6$). Es apreciable que L^* manifiesta un aumento desde el ápice a la base del espárrago, lo que se traduce en un incremento de la luminosidad. El parámetro a^* , relacionado con el color verde, no presentó diferencia estadística entre las secciones ápice ($a^* = -17.9$) y medio ($a^* = -18.0$). En cambio, en la base el parámetro a^* fue superior, es decir, su coloración verde no es tan intensa como en el resto del espárrago. El parámetro b^* resultó estadísticamente diferente en las tres secciones.

2 Caracterización fitoquímica

En el **Cuadro 6** se presentan los resultados de la caracterización fitoquímica de espárrago fresco. La sección apical resultó ser la más rica en compuestos fenólicos (2259 mg E.A.G. / 100 g b.s.), seguido de la sección medio (2114 mg E.A.G. / 100 g b.s.) y base (1952 mg E.A.G. / 100 g b.s.).

Cuadro 6. Caracterización fitoquímica de espárrago fresco.

Sección	Compuestos Fenólicos (mg E.A.G. / 100 g b. s.)
Ápice	2259 ± 79 ^c
Medio	2114 ± 34 ^b
Base	1952 ± 51 ^a

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa. LSD = 115 mg E.A.G. / 100 g b. s. (Fisher, $p \leq 0.05$).

Won y col (2014) encontraron una concentración de compuestos fenólicos de 2,760 mg E.A.G / 100 g b.s. para espárrago. Este resultado es similar al determinado en la sección apical en el presente trabajo, aunque ligeramente superior. Además, los datos obtenidos se encuentran dentro del rango de contenido de compuestos fenólicos para lechuga y *A. acutifolius*, una especie silvestre perteneciente al mismo género que el espárrago.

Diversos autores (Firpo y col 2007; Slatnar y col 2018) observaron el mismo comportamiento; es decir, que la concentración de compuestos fenólicos es mayor en la sección apical, debido a una mayor actividad metabólica en esta zona, y que ésta disminuye al alejarse de la sección apical.

3 Caracterización nutrimental

Los resultados de la caracterización nutrimental se muestran en el **Cuadro 7**. La región apical del espárrago contenía más Vitamina C. En contraste, las zonas medio y base presentaron una concentración menor, y no manifestaron diferencia significativa entre su contenido de ácido ascórbico.

Brewer y Begum (2003) reportan 46 mg de ácido ascórbico / 100 g f.f., el cual se encuentra por encima de los obtenidos en este estudio. Esta diferencia puede ser atribuida a factores como la variedad empleada y prácticas agrícolas. El hecho de encontrar un mayor contenido de Vitamina C en el ápice del espárrago también fue descrito por Mastropascua y col (2016). Al cuantificar el contenido de Vitamina C en espárrago fresco, explican que éste fue 2.5 veces mayor en el ápice que en la base del espárrago.

Cuadro 7. Caracterización nutrimental de espárrago fresco.

Sección	Vitamina C (mg ácido ascórbico / 100 g f. f.)
Ápice	37.2 ± 3.2 ^b
Medio	25.6 ± 3.1 ^a
Base	24.4 ± 1.3 ^a

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa. LSD = 5.3 mg ácido ascórbico / 100 g f. f. (Fisher, $p \leq 0.05$).

La mayor concentración de ácido ascórbico en el ápice, comparada con las demás secciones, es una consecuencia de la alta actividad mitótica del tejido meristemático, del cual, la región apical está conformada (Mastropascua y col 2016).

4 Caracterización enzimática

En el **Cuadro 8** se presentan los resultados de la caracterización enzimática de espárrago fresco.

La actividad enzimática de Peroxidasa determinada en la sección apical fue de 0.004 U / mL, en la sección medio 0.005 U / mL y en la base del espárrago 0.016 U / mL. Morales-Blancas y col (2002) encontraron una actividad enzimática de 0.110 y 0.140 U / mL para las secciones ápice y base, respectivamente. Dichos resultados evidencian que la mayor actividad enzimática de Peroxidasa se encuentra en la base del espárrago.

B MODELOS EXPERIMENTALES DE REGRESIÓN PARA PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, FITOQUÍMICO, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO DE ESPÁRRAGO ESCALDADO

1 Parámetros fisicoquímicos

a Firmeza

En la **Figura 2** se muestra el comportamiento de la retención de firmeza (% *RF*) en función de la temperatura y el tiempo de proceso para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) del espárrago.

Cuadro 8. Caracterización enzimática de espárrago fresco.

Sección	Actividad Enzimática de Peroxidasa (U / mL)
Ápice	0.004 ± 0.00005 ^a
Medio	0.005 ± 0.0003 ^a
Base	0.016 ± 0.0009 ^b

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa. LSD = 0.001

U / mL (Fisher, $p \leq 0.05$).

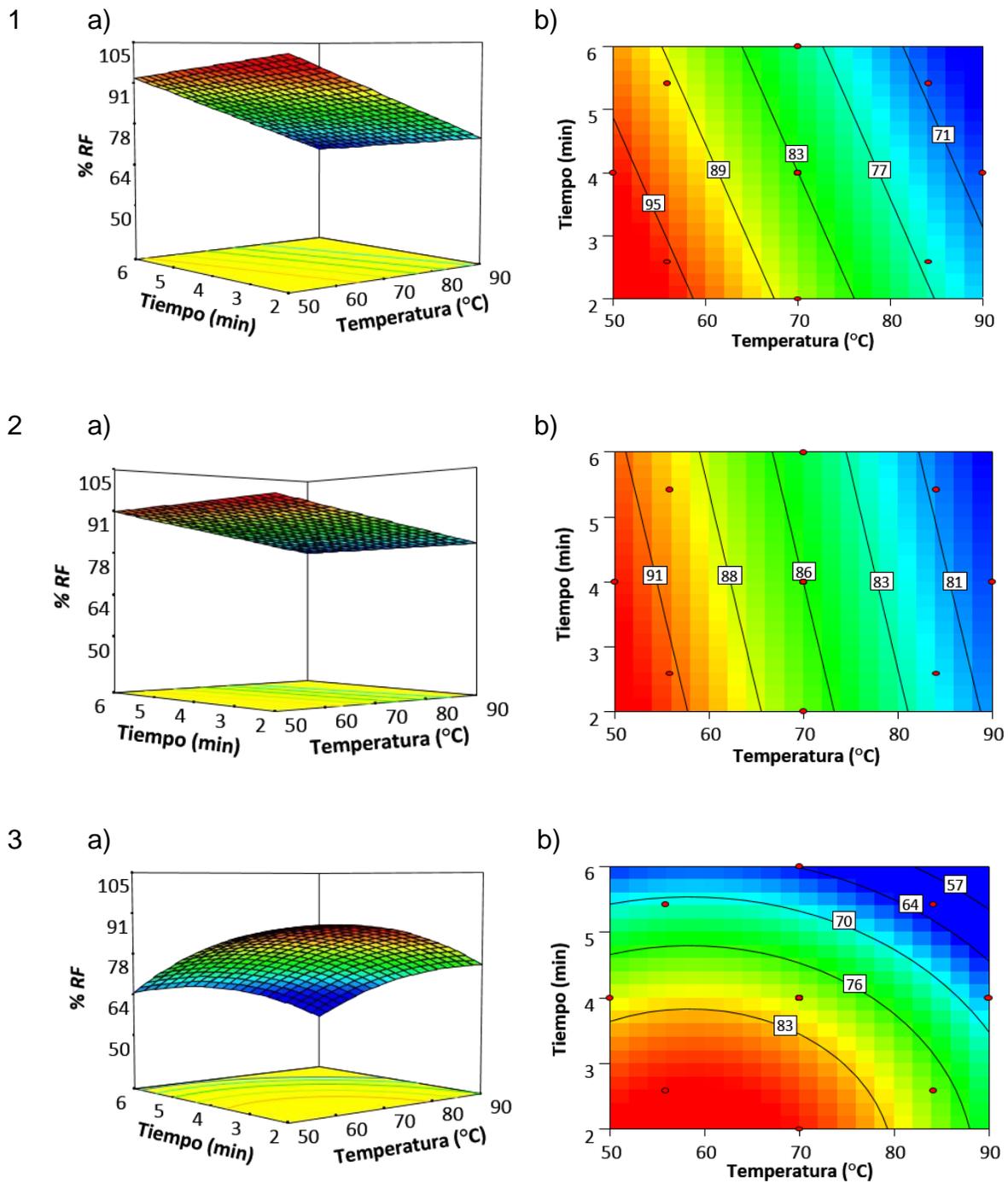


Figura 2. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de retención de firmeza (% *RF*) para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.

En la sección apical (**Figura 2-1**), la firmeza disminuyó de manera lineal al aumentar la temperatura y el tiempo de proceso. La retención de firmeza experimental varió entre 67-97 %. La máxima retención de firmeza se encontró a 4 min y 50 °C. La temperatura presentó mayor efecto sobre la retención de firmeza que el tiempo de escaldado en el intervalo de estudio de ambos factores. Esto se puede apreciar en el gráfico por la mayor pendiente del % *RF* contra temperatura que la pendiente del % *RF* contra tiempo de escaldado. El modelo de predicción con variables codificadas fue el siguiente:

$$\% RF = 83.39 - 9.84x_1 - 2.98x_2$$

Donde x_1 representa la temperatura y x_2 el tiempo. Los modelos mostrados son representados en términos de variables codificadas, esto para facilitar las comparaciones de los efectos de cada factor. En el modelo de predicción resultaron significativos solo los términos de temperatura y tiempo lineales. Además, el modelo explicó el 82 % de la variación de los datos ($p = 0.0002$), no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.09$) y el coeficiente de variación fue menor al 10 % (5.10), por lo que se puede concluir que el modelo resulta adecuado y reproducible. La magnitud del coeficiente de regresión para la temperatura (9.48) es mayor que el correspondiente para el tiempo de escaldado (2.98), lo que corrobora que la temperatura presentó el mayor efecto sobre el % *RF*, comparado con el efecto ejercido por el tiempo de escaldado.

En la sección media (**Figura 2-2**) la retención de firmeza decreció al aumentar la magnitud de la temperatura y el tiempo de escaldado. El máximo de retención se aprecia al escaldar a 50 °C durante 4 minutos, mientras que la mínima retención se da

con un escaldado a 84.1 °C durante 5.4 minutos. Los resultados experimentales de retención de firmeza se encontraron dentro del rango 78.4-92.4 %. La temperatura ejerció el mayor efecto sobre el % *RF* que el tiempo pues en el gráfico se aprecia una mayor pendiente sobre el % *RF* contra temperatura que entre el % *RF* contra tiempo. A continuación se presenta el modelo de predicción:

$$\% RF = 85.81 - 4.45x_1 - 0.73x_2$$

El modelo presentó un comportamiento lineal con los términos de temperatura y tiempo como términos significativos. La magnitud del coeficiente que acompaña a la temperatura (4.45) es mayor que el coeficiente del tiempo (0.73), lo que se traduce en un mayor efecto de este factor sobre la retención de firmeza; el signo que le precede indica que al aumentar la magnitud del factor, entonces disminuye la magnitud de la respuesta.

El 92 % de la variación total de los datos fue explicada por el modelo ($p < 0.001$), no hubo falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.75$), se obtuvo un coeficiente de variación de 1.32 %, que es menor al máximo aceptable (10 %). Con estas condiciones se puede asegurar que el modelo es aceptable y reproducible.

La retención de firmeza en la base (**Figura 2-3**) disminuye con el aumento de la temperatura y el tiempo de proceso. Se observa que el tratamiento a alta temperatura y mayor tiempo consigue los menores porcentajes de retención de firmeza. Los porcentajes de retención de firmeza experimentales se encuentran en el rango 62.7-87.9 %. El modelo de predicción fue el siguiente:

$$\% RF = 79.98 - 4.81x_1 - 8.42x_2 - 2.93x_1^2 - 2.27x_2^2$$

A diferencia de los modelos para el resto de las secciones del espárrago se observa que para este caso, también resultaron significativos los términos de temperatura y tiempo cuadráticos.

El modelo de predicción explicó el 95 % de la variación total de los datos experimentales ($p < 0.0001$), no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.48$) y el coeficiente de variación fue menor al 10 % (3.03 %), por lo que se puede decir que el modelo es repetible.

Es importante conocer el comportamiento de la firmeza ante factores como temperatura y tiempo durante el escaldado, no solo con el fin de establecer sistemas de control en los procesos: sino también, para satisfacer las exigencias de los consumidores, las cuales señalan una preferencia por texturas más firmes (Aguilar y col 1999).

Fuentealba (2004) observó que la temperatura y el tiempo de escaldado tienen un efecto significativo en la firmeza. Aplicar tratamientos térmicos afecta la resistencia a la perforación en comparación con los espárragos frescos. De acuerdo con sus resultados, se observa un notorio aumento en la pérdida de firmeza de los espárragos escaldados a 95 °C, también observó que el aumento del tiempo de escaldado provocaba una disminución de la resistencia a la perforación. Además, en sus conclusiones enuncia que los modelos de forma lineal en los que participan el tiempo y la temperatura como términos lineales, logran explicar de buena forma la variación de la firmeza del espárrago.

Esto último resulta apegarse a los resultados de este trabajo solo para las secciones ápice y medio. En cambio, para el caso de la base en el modelo aparecen también los términos cuadráticos de los factores. El hecho de que el modelo de la sección base tenga esta forma puede ser atribuido a la existencia de algún componente lábil que a medida que se lleva a cabo el proceso se libera y provoca que de esta forma la firmeza disminuya, tal como lo explica Rodrigo y col (1998).

Las pérdidas de firmeza producidas durante el procesamiento son ocasionadas, principalmente, por alteraciones en la estructura celular del producto. Estas alteraciones provocan cambios en la permeabilidad y aumenta la flexibilidad (Aguilar y col 1999).

b Diferencia total de color

El efecto de la temperatura y el tiempo de proceso sobre la diferencia total de color en tres diferentes secciones del espárrago: ápice (1), medio (2) y base (3); se aprecia en la **Figura 3**.

Para la zona apical (**Figura 3-1**), los resultados experimentales de diferencia total de color se encontraron entre 5.2 y 9.6. Se observa que si el escaldado se lleva a cabo a alta temperatura y durante un tiempo prologado la diferencia total de color es mayor. Para esta respuesta el modelo de predicción fue el siguiente:

$$\Delta E = 7.49 + 1.38x_1 + 0.25x_2$$

En el modelo aparecen los términos de temperatura y tiempo lineales, los cuales fueron significativos. El efecto de la temperatura es mayor que el del tiempo, puesto que el coeficiente de regresión para este factor es mayor. El modelo pasó la prueba

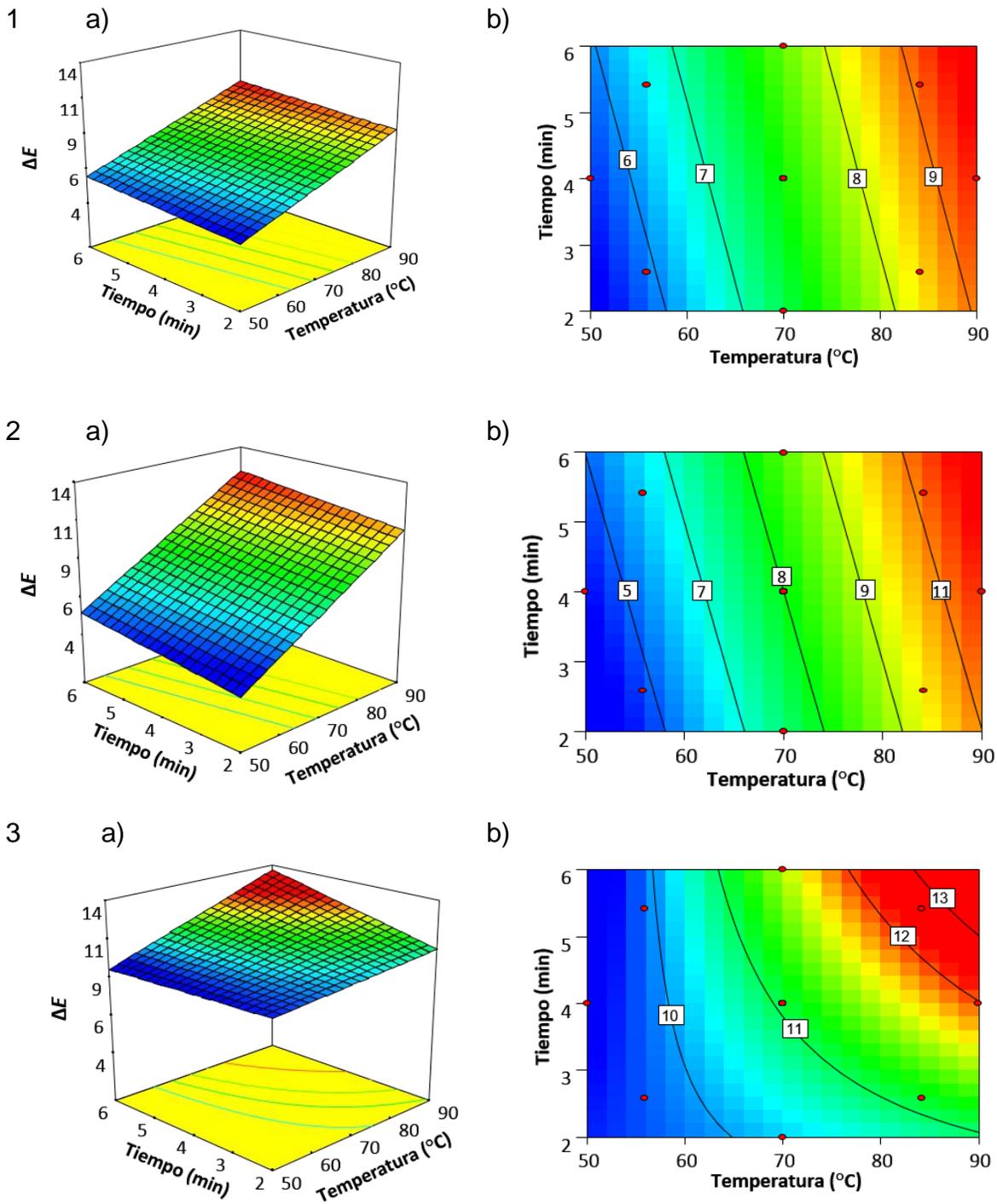


Figura 3. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el ΔE para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.

de falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.63$), presentó un coeficiente de variación de 4.56 %, y explicó el 93 % de la variación de los datos experimentales.

El comportamiento de la diferencia total de color en función de los factores, temperatura y tiempo, en la sección media del espárrago se presenta en la **Figura 3-2**. En ésta se observa que un aumento en la temperatura y tiempo de escaldado producen, de igual forma, un aumento en la respuesta. La diferencia total de color alcanzó un máximo (11.6) tras someter los tejidos vegetales a una temperatura de 90 °C y un tiempo de 4 minutos. En contraste, el mínimo de la variable de respuesta se consiguió con un escaldado de 50 °C y 4 minutos. El modelo de predicción se muestra a continuación:

$$\Delta E = 8.01 + 2.28x_1 + 0.46x_2$$

En este modelo de predicción aparecen los términos de temperatura y tiempo. No presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.27$), tuvo un coeficiente de variación inferior al 10 % (8.07 %) y explicó el 91 % de la variación de los datos experimentales, por lo tanto, se considera al modelo como adecuado y reproducible. El efecto de la temperatura fue mayor que el del tiempo, ya que como se aprecia, la pendiente correspondiente es mayor que para el tiempo y además el coeficiente de regresión para la temperatura fue mayor.

En la **Figura 3-3** se aprecia el gráfico de superficie (3a) y contornos (3b) que describen el comportamiento de la diferencia total de color en la sección base del espárrago. Con respecto a esta variable podemos observar que el tratamiento que provocó una mayor diferencia correspondió a temperatura elevada y tiempo

prolongado. Los resultados experimentales variaron dentro del rango 9.5-12.1. El modelo de predicción fue:

$$\Delta E = 10.67 + 0.86x_1 + 0.41x_2 + 0.37 x_1x_2$$

En el anterior modelo de predicción resultaron significativos los términos de temperatura y tiempo, además de su interacción. Dicho modelo logró explicar el 96 % de la variación total de los datos experimentales ($p < 0.0001$), no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.62$) y el coeficiente de variación fue 1.66 %.

Li y col (2006) reportaron cambios de color en espárrago en el rango de 1.4 a 11.1, catalogando esta última como una diferencia notable de cambio de color. Estas magnitudes resultan similares a las encontradas en este estudio.

La cinética de degradación del color de los vegetales es compleja y a menudo, los modelos confiables para predecir el cambio de color experimental son limitados. El principal hallazgo de los diferentes estudios es que tanto la degradación del pigmento y color durante el procesamiento térmico sigue la cinética de reacción de primer orden (Encalada 2015). De acuerdo con diversos autores, las hortalizas tratadas térmicamente sufren una degradación de la clorofila, la cual es la causante de una modificación de su color. Esta degradación obedece a una cinética de primer orden (Schmalko y Alzamora 2001; Weemaes y col 1999).

El parámetro a^* del color solo representa al pigmento mayoritario y no representa el cambio total de color durante el tratamiento de vegetales. En la práctica, cualquier cambio en el parámetro a^* está asociado con un cambio simultáneo en L^* y b^* . La

representación de la calidad en términos del color total puede ser lo más relevante desde el punto de vista del procesamiento (Ahmed y col 2004).

c Compuestos fenólicos

El porcentaje de retención de compuestos fenólicos en las secciones ápice, medio y base; y su comportamiento ante los factores; temperatura y tiempo, se presentan en la **Figura 4**.

Específicamente, en la sección apical (**Figura 4-1**) se puede ver que un aumento en la temperatura y tiempo de proceso provocan que la retención de compuestos fenólicos disminuya, y que, aunado a esto, las regiones en el gráfico con mayor retención se ubiquen a bajas temperaturas y tiempos cortos de escaldado. Los resultados experimentales variaron entre el 47.6 y 66.7 % de retención. El tiempo de escaldado presentó mayor efecto que la temperatura sobre la retención de compuestos fenólicos. El modelo de predicción fue lineal.

$$\% RCF = 58.14 - 2.24x_1 - 6.53x_2$$

En el modelo resultaron significativos los términos de temperatura y tiempo lineales, no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.96$), tuvo un coeficiente de variación de 3.35 % y explicó el 92 % de la variación total de los datos experimentales. Dado que cumplió con los requisitos se concluye que el modelo es adecuado y reproducible.

El contenido de compuestos fenólicos en la sección media del espárrago y su

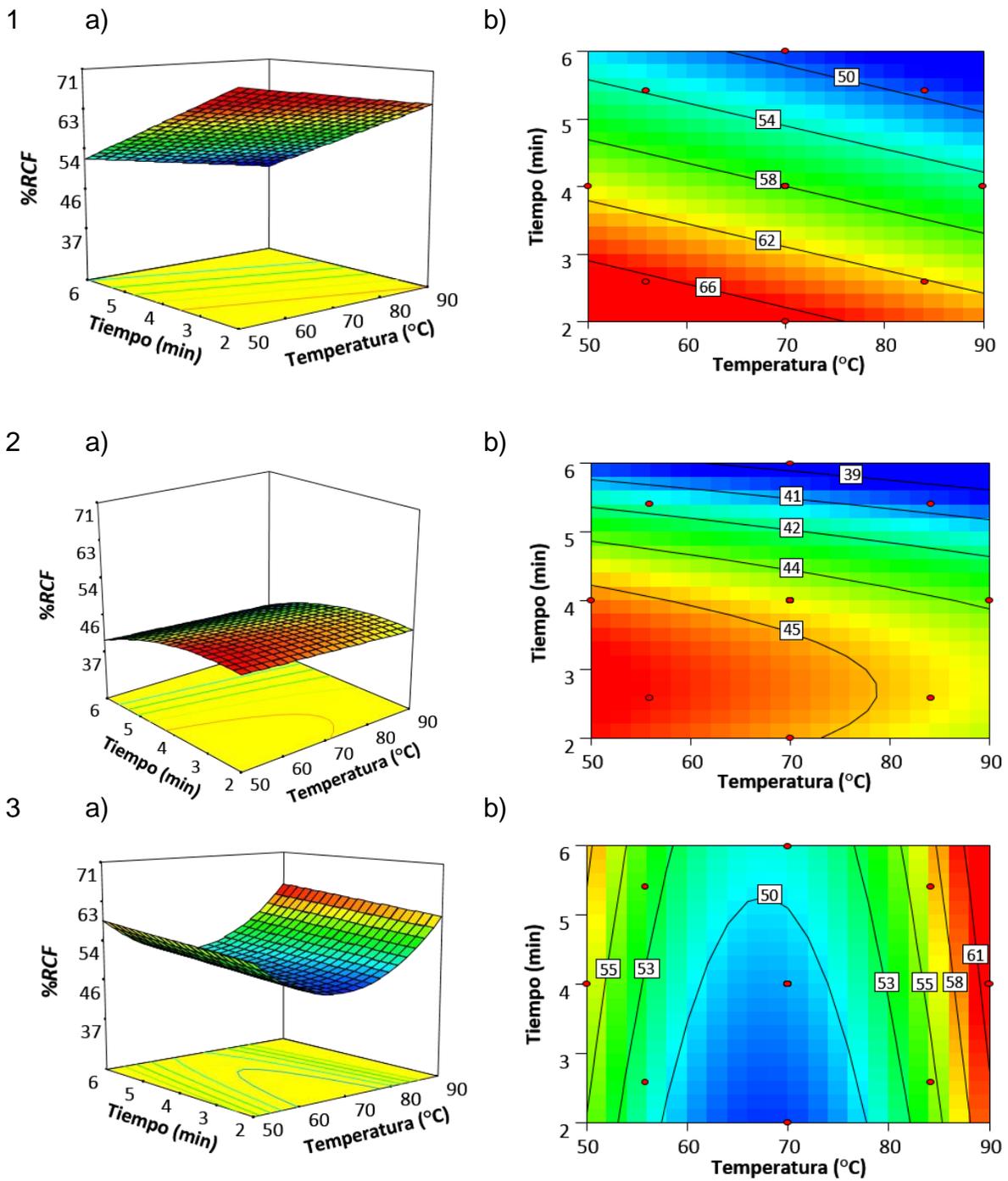


Figura 4. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % *RCF* para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.

comportamiento en función de la temperatura y tiempo de proceso se aprecian en la **Figura 4-2**. La retención de compuestos fenólicos varió entre el 39.2 y 46.5 %. Un escaldado aplicado a bajas temperaturas y cortos tiempos del rango experimental dio como resultado un mayor porcentaje de retención, mientras que un tratamiento hecho a altas temperaturas y tiempos más extensos ocasionó que el porcentaje de retención disminuyera. El factor que presentó mayor efecto sobre la retención de compuestos fenólicos fue el tiempo de escaldado. El modelo de predicción deducido fue el siguiente:

$$\% RCF = 44.63 - 0.76x_1 - 2.39x_2 - 1.29x_2^2$$

Dado que el modelo logró explicar el 87 % de la variación total de los datos, no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.92$), y el coeficiente de variación fue menor del 10 % (2.24 %); su puede decir que el modelo es repetible.

En la **Figura 4-3** aparece el comportamiento de la retención de compuestos fenólicos en función de la temperatura y el tiempo de escaldado para la sección base del espárrago. Los gráficos muestran una zona de menor retención a temperatura intermedia de proceso (entre 60 y 80 °C), y durante todo el rango de tiempo. En contraste, las zonas de mayor retención se encontraron a temperaturas bajas y cortos tiempos, y a temperaturas altas y en todo el rango de tiempo. Los datos experimentales variaron entre 46.2 y 61.4 %. El modelo de predicción obtenido se presenta a continuación:

$$\% RCF = 48.82 + 1.78x_1 + 1.19x_2 + 5.27x_1^2$$

El modelo de predicción tuvo como términos significativos la temperatura, el tiempo y la temperatura cuadrática. También, logró explicar el 93 % de la variación de los datos, no hubo falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.66$), el coeficiente de variación fue de 2.67 %, por lo tanto, se concluye que el modelo es adecuado y reproducible.

Véliz (2018) reporta 2380 mg E.A.G. / 100 g, contenido que se encuentra dentro de los intervalos encontrados en esta investigación. En contraste, Fan y col (2014) reportan una concentración superior de 7170 mg E.A.G. / 100 g en compuestos extraídos con metanol al 90 %. De acuerdo con Gobbo-Neto y Lopes (2007), son diversos los factores que afectan la cantidad de metabolitos secundarios en vegetales, tales como la estacionalidad, temperatura, disponibilidad de agua, la radiación UV, los nutrimentos del suelo, e incluso el método de laboratorio empleado para la extracción.

Véliz (2018) observó también, que durante el procesamiento de espárrago, el contenido de compuestos fenólicos se veía mermado, sobre todo en las etapas de escaldado y tratamiento térmico, donde éste se redujo en un 42 y 62.1 %, respectivamente.

Wachtel-Galor y col (2008), observaron una disminución en el contenido de compuestos fenólicos tras un proceso de cocción en comparación con muestras de brócoli y coliflor crudos. Estos autores explican que esta disminución puede deberse a la degradación de los compuestos por la temperatura alcanzada durante el proceso. También compararon diferentes métodos de cocción y notaron que la mayor disminución se producía al cocer en agua por sobre cocción con vapor y microondas.

Este fenómeno también fue explicado por González y col (2016), y atribuyeron dicha reducción a la lixiviación de los compuestos.

d Vitamina C

En la **Figura 5** se muestra el comportamiento de la retención de ácido ascórbico (% *RAA*) en función de la temperatura y el tiempo de proceso para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) del espárrago.

En la sección apical (**Figura 5-1**) se observaron mayores porcentajes de retención de Vitamina C a bajas temperaturas y cortos periodos de escaldado. A medida que la temperatura y el tiempo aumentan, los porcentajes de retención disminuyen. La retención de Vitamina C en la sección ápice se encontró en el intervalo 22.4 a 84.8 %. Para Vitamina C, el efecto de la temperatura fue mayor que el del tiempo de escaldado en el intervalo estudiado para los factores. El modelo de predicción codificado fue:

$$\% RAA = 53.56 - 21.12x_1 - 5.37x_2$$

Resultaron significativos la temperatura y el tiempo. Dicho modelo no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.31$), tuvo un coeficiente de variación de 9.5 % y explicó el 93 % de variación en la respuesta.

En el caso de la sección medio (**Figura 5-2**), los mayores porcentajes de retención se localizaron a bajas temperaturas y tiempos cortos, y se mostró una tendencia de disminución en la respuesta a medida que la temperatura y el tiempo se incrementaron. La retención de Vitamina C estuvo entre 25.8 y 94.7 %. También para la sección medio, la temperatura tuvo mayor efecto que el tiempo sobre la retención de ácido ascórbico. El modelo de predicción fue el siguiente:

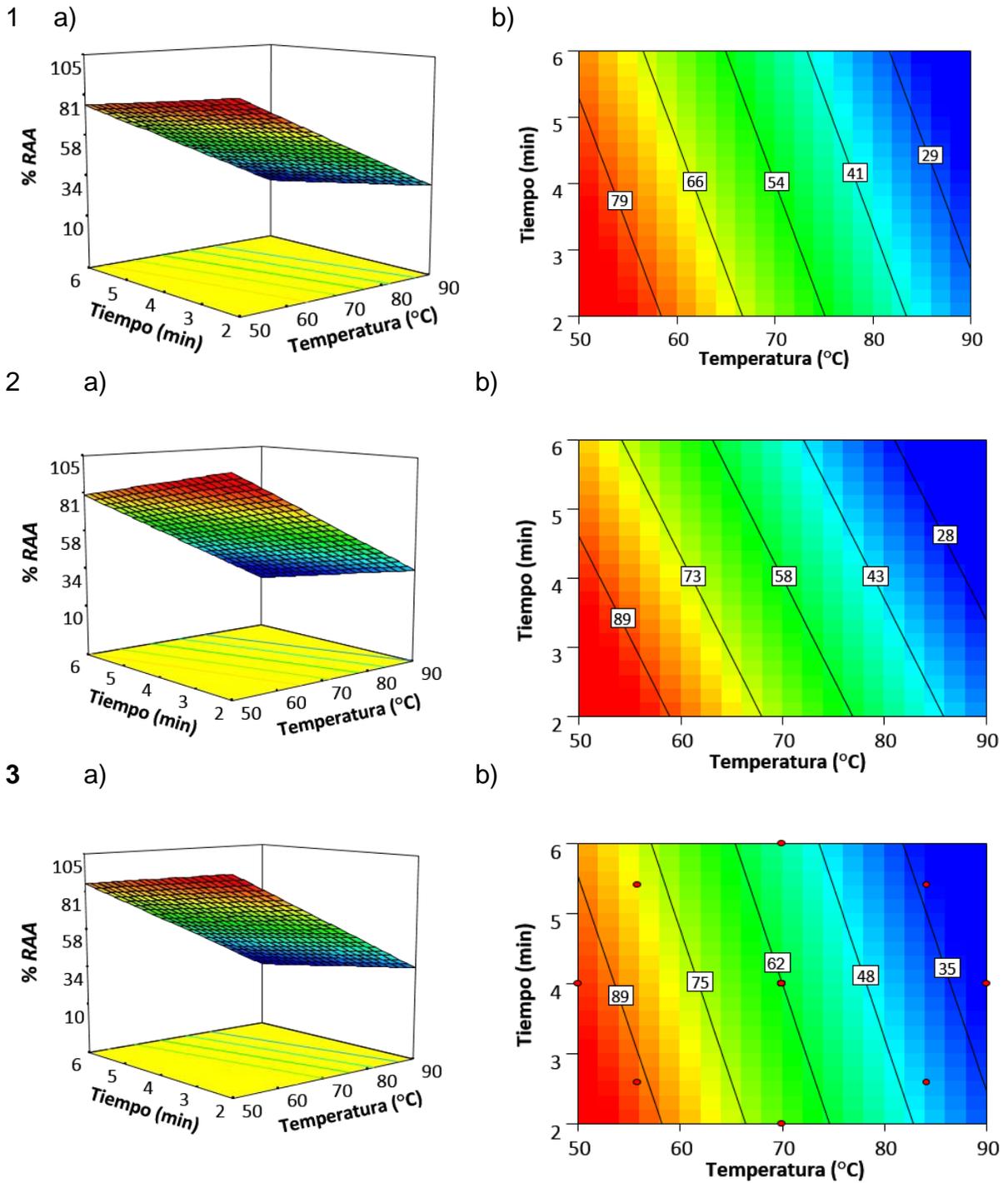


Figura 5. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % **RAA** para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.

$$\% RAA = 58.19 - 24.07x_1 - 8.27x_2$$

Resultaron significativos los términos de tiempo y temperatura. El modelo no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.41$), tuvo un coeficiente de variación de 8.2 %, y explicó el 96 % de la variación total de los datos.

En la sección base (**Figura 5-3**), se observó un comportamiento similar a las otras dos secciones: mayores porcentajes de retención a bajas temperaturas y tiempos cortos de procesamiento. De igual manera, aumentos en el tiempo y la temperatura de escaldado resultaron en una disminución en el porcentaje de retención. La retención de Vitamina C se encontró en un rango de 30.1 a 97.9 %. De nueva cuenta, en la sección base la Vitamina C se vio más afectada por la temperatura que por el tiempo de escaldado. El modelo codificado de predicción fue:

$$\% RAA = 61.60 - 23.24x_1 - 5.41x_2$$

En el modelo, tiempo y temperatura en su forma lineal resultaron significativos. No presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.17$), tuvo un coeficiente de variación de 7.8 %, y explicó el 95 % de la variación de los datos.

En este trabajo, los modelos que describen la degradación de Vitamina C durante el escaldado mostraron un comportamiento lineal en las tres secciones; similarmente reportes hechos por diversos autores coinciden en que la degradación de Vitamina C es bien descrita por este tipo de modelos (Frías y Oliveira 2001; Zheng y col 2011). Al contrastar el porcentaje de retención de las tres secciones se puede observar que hay una menor retención en el ápice del espárrago, aunque muy similar para la sección medio. Zheng y Lu (2011) concluyeron que la sección apical es la más lábil a la pérdida

de Vitamina C que el resto del espárrago durante tratamientos térmicos. Esto probablemente se deba a que este segmento presenta una textura más blanda, lo cual incrementa la lixiviación y, además, la resistencia a la penetración de calor resulta menor.

e Actividad enzimática de Peroxidasa

En la **Figura 6-1** se muestra el comportamiento del porcentaje de retención de actividad enzimática, para la sección apical del espárrago, dependiente de la temperatura y el tiempo de escaldado. Se obtuvo una menor retención a altas temperaturas y largos tiempos de escaldado. Los porcentajes de retención se encontraron entre 2.3 y 87.2 %. La actividad de Peroxidasa se vio más afectada por la temperatura que por el tiempo de escaldado dentro del rango de estudio. El modelo de predicción resultante es el siguiente:

$$\% RAE = 42.02 - 26.16x_1 - 17.98x_2$$

Resultaron significativos los términos de temperatura y tiempo. No presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.70$), el coeficiente de variación fue de 9.3 %. El modelo explicó el 98 % de la variación de los datos experimentales.

En la **Figura 6-2** se presenta la retención de actividad enzimática en la sección medio del espárrago. Se aprecia que las menores retenciones se encontraron a altas temperaturas y largos periodos de tiempo de proceso. Los porcentajes de retención se hallaron entre 0.7 y 45.8 %. El modelo de predicción fue:

$$\% RAE = 22.78 - 16.19x_1 - 3.07x_2$$

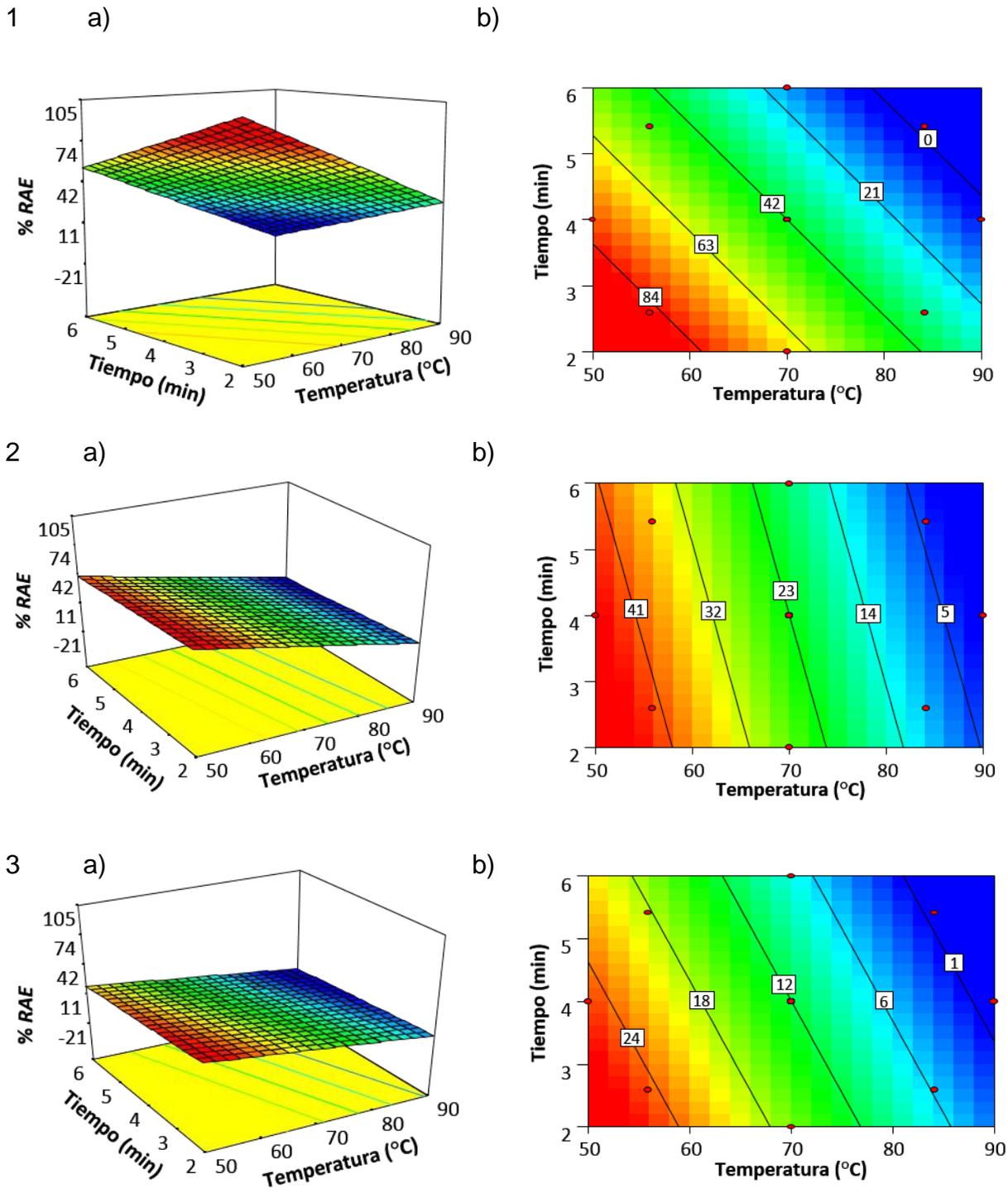


Figura 6. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % *RAE* para las secciones ápice (1), medio (2) y base (3) de espárrago.

En el modelo, los términos de temperatura y tiempo resultaron significativos, no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.78$), tuvo un coeficiente de variación de 7.5 %, y el modelo logró explicar el 98 % de la variación de los datos experimentales. La magnitud del coeficiente de regresión para la temperatura (16.19) fue mayor que para el tiempo de escaldado (3.07), lo que indica que la actividad de la Peroxidasa fue más sensible a la temperatura que al tiempo de escaldado en el rango estudiado.

En la **Figura 6-3** se presenta el gráfico de superficie para el porcentaje de retención de actividad enzimática para la sección base. La mayor retención de actividad enzimática se logró a bajas temperaturas y tiempos cortos, y a medida que la temperatura y el tiempo aumentan se logra disminuir el porcentaje de retención. La retención de actividad enzimática se encontró entre 0.3 y 27.2 %. A continuación, se presenta el modelo de predicción obtenido:

$$\% RAE = 12.23 - 9.15x_1 - 3.11x_2$$

La respuesta para esta sección muestra un comportamiento lineal; tanto la temperatura como el tiempo resultaron ser significativos. No se encontró un efecto significativo en la falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.62$), el coeficiente de variación fue de 9.6 %, y logró explicar el 98 % de la variación de los datos experimentales.

Los porcentajes de retención de actividad enzimática variaron en las tres secciones estudiadas. La zona apical fue la región en la que se logró reducir en mayor medida la actividad enzimática y la base la que presentó mayor retención de actividad. Wang y Luh (1983) explican que la distribución de una misma enzima varía dentro de la misma hortaliza, sobre todo si existen diferencias estructurales o químicas. Estas diferencias

se traducen en diferencias en la penetración de calor y en la termoresistencia de las enzimas. Ganthavorn y col (1991) redujeron hasta un 46 % la actividad enzimática de Peroxidasa en espárragos tras someterlos a 10 minutos de escaldado a 60 °C, dicho resultado es similar a los encontrados en este estudio. Estudios reportan que es posible encontrar dos isoenzimas de Peroxidasa con diferentes susceptibilidades a la desnaturalización por calor: una lábil y otra resistente. Este comportamiento de degradación bifásica fue observado por Soysal y Soylemez (2005) a temperaturas inferiores a 70 °C. El comportamiento de la inactivación a 75 °C o temperaturas mayores ocurren por procesos más simples. De acuerdo con esto, en el presente estudio se observa un comportamiento monofásico para las tres zonas del espárrago estudiadas.

C MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE ESPÁRRAGO ESCALDADO

1 Optimización del proceso de escaldado

Con el fin de obtener las condiciones de procesamiento, fueron seleccionadas de cada una de las variables de respuesta solo una de las tres secciones, y asignadas con un valor subjetivo deseable en el producto final escaldado. Como características deseables se estableció una mayor firmeza, retención de compuestos fenólicos y ácido ascórbico, así como una menor diferencia total de color y actividad enzimática.

Para la optimización del proceso de escaldado se le dio mayor importancia a la actividad enzimática (++++), seguida de la Vitamina C (+++) y el resto de las variables participaron con una misma importancia (+ para: firmeza, diferencia total de color y compuestos fenólicos). Además, le fue conferido a las variables firmeza y diferencia

total de color una ponderación de 0.1 (de entre 0.1 y 10), y a las variables: compuestos fenólicos, Vitamina C y actividad enzimática una ponderación igual a la unidad.

La asignación de ponderación a las variables durante la optimización se refiere a la flexibilidad que el software tendrá para cumplir con el objetivo (mínimo o máximo). La ponderación que se les asigna a las variables de respuesta puede estar entre 0.1 a 10. Las ponderaciones menores a 1 dan menos énfasis al objetivo, una ponderación igual a 1 hará que la deseabilidad individual para esa respuesta varíe de forma lineal, y ponderaciones entre 1 y 10 dan más énfasis al objetivo.

Las deseabilidades individuales de las variables de respuesta y la deseabilidad global obtenidos se muestran en la **Figura 7**. A pesar de que la deseabilidad individual del porcentaje de retención de ácido ascórbico (% *RAA*) y retención de actividad enzimática (% *RAE*) fueron bajos, la deseabilidad global alcanzó un valor aceptable de 0.631. Lo cual, categoriza al producto final como “aceptable y bueno” según diferentes escalas reportadas (Bacio 2007; Ribardo y Allen 2003)

Se definieron 75.9 °C y 2.1 min como la mejor combinación para el proceso de escaldado. Este tratamiento debería producir espárragos con una mayor retención de firmeza, compuestos fenólicos y Vitamina C; así como una menor diferencia total de color y retención de actividad enzimática.

2 Validación de los modelos de predicción

Con las condiciones sugeridas por el programa, se realizaron cinco corridas de validación para cada variable de respuesta. Como se puede observar en el **Cuadro 9**

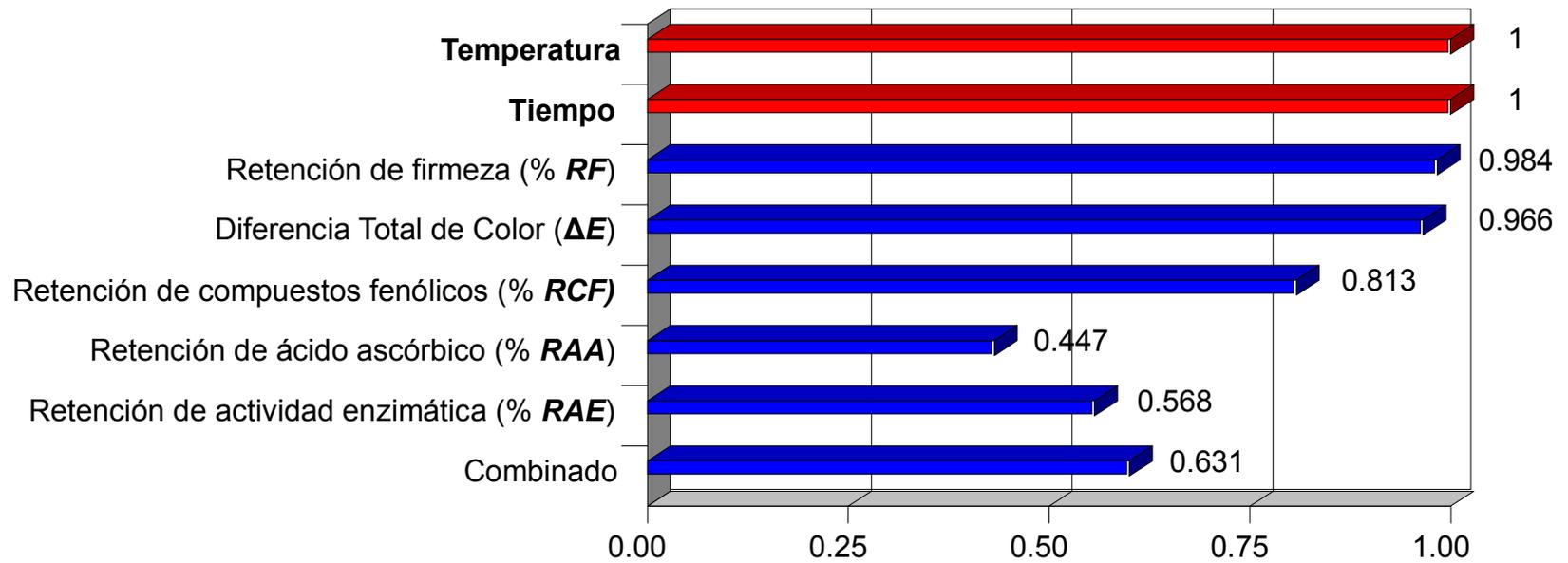


Figura 7. Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de espárrago.

Cuadro 9. Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en espárrago escaldado.

Variable	Experimental	Exacto	Predicción	
			Mínimo	Máximo
% <i>RF</i>	85.3 ± 1.3	84.16	79.73	88.60
<i>ΔE</i>	10.3 ± 0.1	10.27	10.01	10.52
% <i>RCF</i>	44.6 ± 0.6	45.20	43.60	46.80
% <i>RAA</i>	41.2 ± 2.4	39.74	34.83	44.66
% <i>RAE</i>	20.6 ± 0.6	20.12	17.94	22.29

RF = retención de firmeza, *ΔE* = diferencia total de color, *RCF* = retención de compuestos fenólicos, *RAA* = retención de ácido ascórbico, *RAE* = retención de actividad enzimática.

las variaciones entre lo predicho y lo validado en forma experimental fueron muy semejantes.

Los resultados estimados y los obtenidos experimentalmente no presentan diferencia estadística significativa, lo que indica que se validan las ecuaciones y resultados de optimización.

D CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, FITOQUÍMICO, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICO DE ESPÁRRAGO ESCALDADO OPTIMIZADO RESPECTO AL FRESCO

1 Parámetros fisicoquímicos

Se presenta en el **Cuadro 10** la comparación de los parámetros fisicoquímicos (humedad, pH, acidez titulable, sólidos solubles totales, firmeza y diferencia total de color) de espárrago escaldado optimizado con respecto al fresco.

En dicho cuadro se observa que el escaldado produce un efecto significativo sobre las variables de respuesta.

a Humedad

La humedad en ápice, medio y base de espárrago escaldado optimizado fueron 93.8 ± 0.1 , 93.5 ± 0.6 y 88.5 ± 1.1 %. La sección base tanto de espárrago escaldado en condiciones optimizadas como de fresco tuvo una menor humedad respecto al resto de las secciones. Sin embargo, al comparar el espárrago escaldado en condiciones optimizadas con sus respectivas secciones en espárrago fresco, no hubo diferencia de humedad entre las secciones.

Cuadro 10. Comparación de los parámetros fisicoquímicos de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.

Sección	Humedad (%)		pH		Acidez Titulable (% de ácido cítrico)		Sólidos Solubles Totales (°Brix)	
	Fresco	Óptimo	Fresco	Óptimo	Fresco	Óptimo	Fresco	Óptimo
Ápice	93.7 ± 0.2 ^b	93.8 ± 0.1 ^b	6.4 ± 0.07 ^b	7.0 ± 0.05 ^e	0.10 ± 0.014 ^b	0.23 ± 0.02 ^d	6.8 ± 0.7 ^d	5.1 ± 0.2 ^c
Medio	93.6 ± 0.3 ^b	93.5 ± 0.6 ^b	6.5 ± 0.02 ^b	6.9 ± 0.10 ^d	0.05 ± 0.003 ^a	0.14 ± 0.02 ^c	5.2 ± 0.5 ^c	4.3 ± 0.4 ^b
Base	88.8 ± 1.5 ^a	88.5 ± 1.1 ^a	6.3 ± 0.05 ^a	6.7 ± 0.06 ^c	0.05 ± 0.003 ^a	0.16 ± 0.03 ^c	5.0 ± 0.1 ^{b,c}	3.0 ± 0.1 ^a

Sección	Firmeza (N)		<i>L*</i>		<i>a*</i>		<i>b*</i>	
	Fresco	Óptimo	Fresco	Óptimo	Fresco	Óptimo	Fresco	Óptimo
Ápice	7.9 ± 1.9 ^{a,b}	6.4 ± 0.4 ^a	50.0 ± 2.2 ^b	44.8 ± 1.4 ^a	-17.9 ± 1.5 ^b	-23.3 ± 0.5 ^a	29.6 ± 0.6 ^b	31.5 ± 0.6 ^c
Medio	8.6 ± 0.6 ^b	7.0 ± 0.4 ^{a,b}	62.9 ± 0.5 ^c	49.7 ± 1.7 ^b	-18.0 ± 1.7 ^b	-24.3 ± 0.6 ^a	32.4 ± 1.1 ^c	35.4 ± 1.0 ^d
Base	15.1 ± 0.4 ^c	13.4 ± 1.6 ^c	63.6 ± 0.1 ^c	47.8 ± 0.5 ^b	-14.5 ± 0.2 ^c	-22.7 ± 0.4 ^a	27.6 ± 0.2 ^a	36.7 ± 0.9 ^d

Letras diferentes indican diferencia significativa. LSD = 1.5 %, LSD = 0.08, LSD = 0.02 % de ácido cítrico, LSD = 0.7

°Brix, LSD = 1.9 N, LSD = 2.4, LSD = 1.7, LSD = 1.5 (Fisher, $p \leq 0.05$).

b pH

El pH en espárrago escaldado fue de 7.0 ± 0.05 , 6.9 ± 0.10 y 6.7 ± 0.06 en ápice, medio y base, respectivamente. Posterior al escaldado la sección apical se definió como la de mayor pH y todas las secciones fueron estadísticamente superiores en pH a los encontrados en espárrago fresco.

Rodríguez y col (2017) encontraron que el pH aumenta significativamente en floretes y hojas de brócoli después de haberlos escaldado.

c Acidez titulable

Al medir la acidez titulable en espárrago escaldado se encontró que la mayor acidez la presentó el ápice (0.23 ± 0.02 %), aunque entre la secciones medio (0.14 ± 0.02 %) y base (0.16 ± 0.03 %) no hubo diferencia significativa. Se observó que había un aumento al comparar este variable, sección a sección, en escaldado contra fresco.

d Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales evaluados en espárrago escaldado dieron como resultado 5.1 ± 0.2 °Brix en ápice, 4.3 ± 0.4 °Brix en medio y 3.0 ± 0.1 °Brix en base. Dichos resultados son estadísticamente menores que los correspondientes en fresco. Cuastumal y col (2016) concluyeron que los procesos térmicos afectaron estadísticamente los sólidos solubles, causando una disminución de los mismos; en frutos de guayaba, mango y tomate de árbol. Explican que estos cambios pueden estar asociados a los procesos de lixiviación y oxidación de los compuestos orgánicos cuando la matriz biológica es afectada por la temperatura.

e Firmeza

El efecto del proceso de escaldado no ocasionó una disminución significativa de la firmeza en las tres secciones del espárrago. La firmeza encontrada en espárrago escaldado para ápice, medio y base fueron 6.4 ± 0.4 , 7.0 ± 0.4 y 13.4 ± 1.6 N; respectivamente.

Jaiswal y col (2012) observaron una reducción de entre 9-28.9 % de la firmeza durante los primeros dos minutos de escaldado en repollo al escaldar a temperaturas entre 80 y 100 °C, las pérdidas de textura continuaron hasta los 14 minutos de escaldado sin mostrar ningún equilibrio. Las discrepancias con el presente estudio pueden deberse a la diferencia en las temperaturas empleadas. Durante el procesamiento térmico, se producen diversas reacciones químicas y enzimáticas que alteran la textura de frutas y hortalizas procesadas. Los cambios químicos, como la solubilización y la despolimerización de los polisacáridos pécticos, afectan los componentes de la pared celular y la lámina media, lo que resulta en un cambio importante en la firmeza de los tejidos (Nisha y col 2006).

f Diferencia total de color

La luminosidad del espárrago en la sección apical ($L^* = 44.8 \pm 1.4$), medio ($L^* = 49.7 \pm 1.7$) y base ($L^* = 47.8 \pm 0.5$) manifestó un decremento tras ser escaldado. En el espárrago escaldado la luminosidad del ápice mostró ser menor con respecto a las otras dos secciones. El parámetro a^* también disminuyó después del proceso, en este caso ninguna de las secciones del espárrago mostró diferencia significativa. Caso contrario fue el parámetro b^* , pues a diferencia del resto de las secciones, este presentó un aumento.

Muftugil (1986) describe que los parámetros L^* y a^* disminuyeron después de haber escaldado ejotes, el efecto resultó significativo para cuatro diferentes métodos. En cambio, dicho autor no encontró un efecto del proceso sobre el parámetro b^* . Rodríguez y col (2017) reportan que al escaldar brócoli, los parámetros de color sufren cambios en las hojas, tallo y florete. La luminosidad se ve afectada durante el proceso. En el caso del parámetro a^* , el escaldado intensifica el color verde. Por el contrario, el parámetro b^* no se ve afectado. Los cambios de color después de los tratamientos térmicos en frutas y hortalizas se deben a la degradación de clorofila, reacciones de isomerización de los carotenoides, polimerización y degradación de las antocianinas, o a las reacciones de pardeamiento de Maillard, tales como condensación de hexosas y componentes de aminoácidos y oxidación del ácido ascórbico (Mena y col 2013).

2 Parámetro fitoquímico

a Compuestos fenólicos

En el **Cuadro 11** se presenta la comparación del contenido de compuestos fenólicos en espárrago fresco contra espárrago escaldado. Se observa que después del tratamiento térmico el ápice posee la mayor concentración de estos compuestos (1481 ± 35), mientras que la concentración de los mismos no fue diferente para las secciones media (944 ± 27) y base (886 ± 52). Todas las secciones manifestaron una disminución significativa de este parámetro al comparar con sus respectivas secciones en las muestras frescas.

Amin y Lee (2005) encontraron el mismo efecto sobre este parámetro al escaldar muestras de tres variedades de repollo, observaron que el tiempo de escaldado

Cuadro 11. Comparación del parámetro fitoquímico de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.

Sección	Compuestos Fenólicos (mg E.A.G. / 100 g b. s.)	
	Fresco	Óptimo
Ápice	2259 ± 79 ^e	1481 ± 35 ^b
Medio	2114 ± 34 ^d	944 ± 27 ^a
Base	1952 ± 51 ^c	886 ± 52 ^a

Letras diferentes indican diferencia significativa. LSD = 87 mg E.A.G. / 100 g b. s.
(Fisher, $p \leq 0.05$).

intensifica la pérdida de compuestos fenólicos. Discuten que el bajo contenido de compuestos fenólicos encontrados en las muestras después del escaldado quizás es ocasionado por la degradación o la liberación de los tejidos vegetales hacia el agua de proceso.

3 Parámetro nutrimental

a Ácido ascórbico

La comparación del contenido de Vitamina C de espárrago escaldado respecto al fresco por cada sección se presenta en el **Cuadro 12**. Este parámetro disminuyó significativamente después del escaldado. La sección apical sufrió el cambio más drástico durante el proceso. No hubo diferencia entre las tres secciones del espárrago después del escaldado.

La mayor degradación de Vitamina C en el ápice puede ser una consecuencia de la mayor concentración que esta sección presenta, una mayor concentración provoca un aumento en la velocidad de degradación. Diversos autores (Carranza-Saavedra y col 2014; Sánchez-Chávez y col 2015; Mendoza-Corvis y col 2015) reportan modelos de primer orden para la degradación de Vitamina C, en estos modelos se observa que, a mayor concentración de Vitamina C, mayor velocidad de degradación. Muftugil (1986) describe el mismo efecto de la temperatura sobre el contenido de ácido ascórbico tras escaldar ejotes con diferentes métodos de escaldado. La disminución de la concentración de la Vitamina C probablemente se debe a la capacidad de esta molécula de ser un eliminador eficaz de radicales que se producen durante el estrés oxidativo, manteniendo así la estabilidad interna. De igual forma, la concentración de

Cuadro 12. Comparación del parámetro nutrimental de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.

Sección	Vitamina C (mg ácido ascórbico / 100 g f. f.)	
	Fresco	Óptimo
Ápice	37.2 ± 3.2 ^c	12.4 ± 1.1 ^a
Medio	25.6 ± 3.1 ^b	14.9 ± 1.9 ^a
Base	24.4 ± 1.3 ^b	14.4 ± 1.3 ^a

Letras diferentes indican diferencia significativa. LSD = 3.8 mg ácido ascórbico / 100 g f. f. (Fisher, $p \leq 0.05$).

oxígeno y la presencia de otros agentes antioxidantes influyen en la degradación de este compuesto bioactivo (Chuah y col 2008).

4 Parámetro enzimático

a Actividad de Peroxidasa

La actividad enzimática de Peroxidasa (**Cuadro 13**) sufrió una disminución en el escaldado con respecto al fresco. Se observa que la base fue la sección que padeció la mayor disminución de actividad enzimática, esto puede deberse a la actividad inicial que presenta el espárrago fresco en esta sección, consecuencia de la mayor concentración de la enzima. Al ser más grande su concentración inicial incrementa la velocidad de degradación. López (2003) muestra en sus resultados que la concentración inicial de enzima afecta la cinética de inactivación térmica y además los parámetros termocinéticos, y por ello señala la importancia de la determinación de la actividad inicial y distribución enzimática que presentan las hortalizas en estado fresco con respecto a sus estructuras y partes, las cuales pueden presentar diferencia de concentración. En cambio, las secciones ápice y medio presentaron la mayor actividad enzimática tras haber escaldado. La sección apical presentó el menor cambio de actividad enzimática respecto al fresco, esta sección pudo haber quedado protegida a la penetración de calor, lo que impidió que la inactivación se llevara a cabo al igual que en las otras secciones. Goncalves y col (2010) encontraron que la inactivación de esta enzima fue afectada por el tiempo y la temperatura de escaldado en zanahoria, logrando inactivar totalmente al aplicar el tratamiento durante 2 minutos a 90 °C.

Cuadro 13. Comparación del parámetro enzimático de espárrago escaldado optimizado respecto al fresco.

Sección	Actividad Enzimática de Peroxidasa (U / mL)	
	Fresco	Óptimo
Ápice	$0.004 \pm 5 \times 10^{-5} \text{ c}$	$0.002 \pm 5.9 \times 10^{-4} \text{ b}$
Medio	$0.005 \pm 3 \times 10^{-4} \text{ d}$	$0.001 \pm 2.7 \times 10^{-4} \text{ a}$
Base	$0.016 \pm 9 \times 10^{-4} \text{ e}$	$0.002 \pm 3.5 \times 10^{-5} \text{ b}$

Letras diferentes indican diferencia significativa. $\text{LSD} = 8 \times 10^{-4} \text{ U / mL}$ (Fisher, $p \leq 0.05$)

E PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE ESPÁRRAGO

1 Conductividad térmica (k)

Se muestra en la **Figura 8** el comportamiento de la conductividad térmica en las secciones ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura. Se observa que esta propiedad aumenta conforme la temperatura se incrementa para las tres secciones. El rango de conductividades para ápice fue de 0.475 a 0.600 W m⁻¹ K⁻¹, 0.448 a 0.542 W m⁻¹ K⁻¹ para medio y 0.433 a 0.583 W m⁻¹ K⁻¹ para base. El modelo de predicción para esta variable en el ápice fue: $k_{\text{Ápice}}=0.0024T + 0.4135$, para medio $k_{\text{Medio}}=0.0015T + 0.4166$ y base $k_{\text{Base}}=0.0026T + 0.3708$ y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87, 0.93 y 0.96, respectivamente. La región apical presentó las mayores conductividades para todas las temperaturas. A la temperatura de 20 y 40 °C no existe diferencia entre las conductividades térmicas de la base y el medio. Sin embargo, al aumentar la temperatura esto cambia, y a 80 °C la conductividad térmica en la base no se diferencia de la conductividad térmica en la región apical.

Rodríguez (2005) reporta una conductividad térmica de 0.587 W m⁻¹ K⁻¹ para espárrago, que fue calculada con la ayuda del software FoodProperty, el cual hace el cálculo de la conductividad con base en la composición del material, y se encuentra dentro de las conductividades encontradas en este estudio; al igual que la reportada por Liang y col (1999), (0.573 W m⁻¹ K⁻¹). Por su parte, Rodrigo y col (1998) reportan una conductividad para espárrago de 0.693 W m⁻¹ K⁻¹ al realizar la determinación a una temperatura superior a los 100 °C. Si se observa la tendencia de los resultados de este estudio es posible deducir que al aumentar la temperatura se pueden alcanzar conductividades similares.

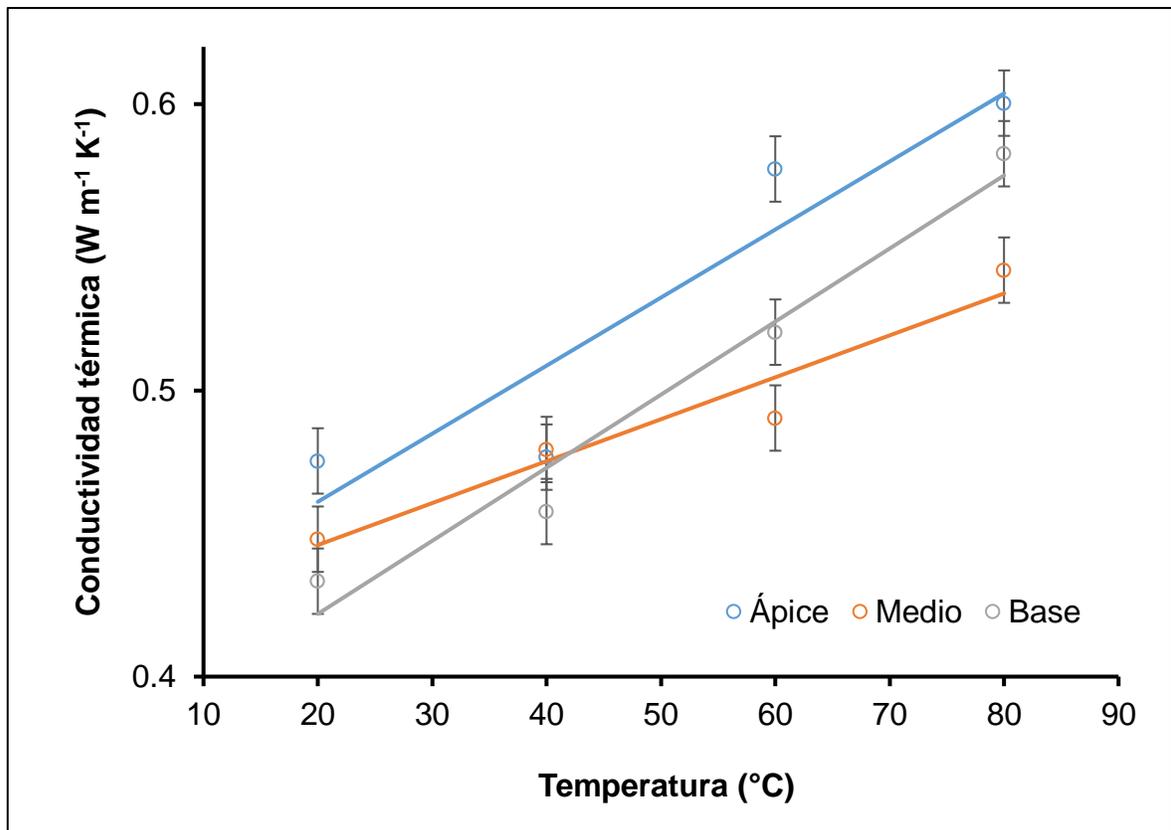


Figura 8. Conductividad térmica en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura. (LSD = 0.022 W m⁻¹ K⁻¹, $\alpha = 0.05$).

Es común encontrar en la literatura relaciones lineales entre la conductividad térmica de los alimentos y su contenido de agua. Esto explica que la sección apical posea una conductividad térmica superior al resto de las secciones, al tener mayor humedad (Sablani y Rahman 2003).

La conductividad térmica de los alimentos depende principalmente de la estructura celular, la presencia de aire, la temperatura y presión del medio y de la humedad del producto (Zambrano y Yupanqui 2016).

2 Capacidad calorífica específica (C_p)

En la **Figura 9** se presenta la capacidad calorífica específica en ápice, medio y base de espárrago. Se observa que esta propiedad se incrementa conforme aumenta la temperatura para las tres secciones. Para el ápice la capacidad calorífica varió entre 3120 y 3924 J kg⁻¹ K⁻¹, en la sección medio el rango de capacidad fue de 3143 a 3508 J kg⁻¹ K⁻¹ y en la base de 3322 a 3805 J kg⁻¹ K⁻¹. Los modelos de predicción obtenidos fueron: $C_{p\acute{A}pice} = 15.202T + 2806.6$, $C_{pMedio} = 5.761T + 3014.5$, $C_{pBase} = 9.026T + 3121.4$, para ápice, medio y base, así como sus respectivos coeficientes de determinación: 0.87, 0.94 y 0.90. Ramos (2013) reporta una capacidad calorífica de 4030 J kg⁻¹ K⁻¹ determinada a 20 °C, propiedad que fue determinada con base en correlaciones para la composición del espárrago en el diseño de un congelador continuo. Las diferencias encontradas con los resultados del presente trabajo pueden atribuirse a la inexactitud de estas correlaciones. Por su parte, Rodrigo y col (1998) obtuvieron una C_p promedio para espárrago de 4084 J kg⁻¹ K⁻¹ en el rango de temperatura de 75 a 125 °C. Califano y Calvelo (1983) presentan en su trabajo una capacidad calorífica de 3579 J kg⁻¹ K⁻¹ para papa, similar a las encontradas en este estudio.

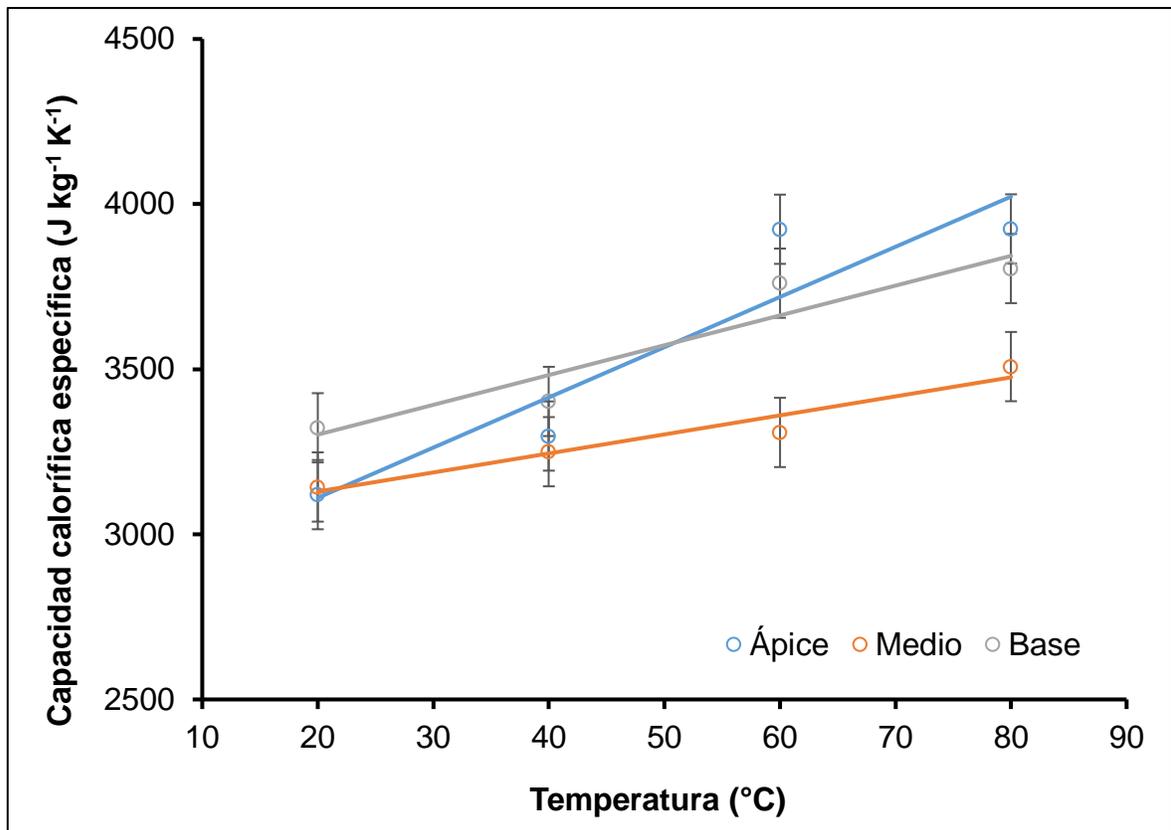


Figura 9. Capacidad calorífica específica en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura. (LSD = $104 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

Las capacidades caloríficas encontradas en este estudio también resultaron cercanas a las reportadas para alcachofa ($3891 \text{ J kg}^{-1} \text{ k}^{-1}$), pepino ($4100 \text{ J kg}^{-1} \text{ k}^{-1}$) y champiñón ($3933 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Productos con elevada humedad, como las bayas, tienen capacidades caloríficas similares ($3724\text{-}4100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Además de la temperatura, que significa un factor importante, sobre todo en procesos de congelación, el contenido de humedad es otro de los factores que más influye en la magnitud de esta propiedad en alimentos (Rahman 2008).

3 Densidad aparente (ρ)

Los resultados para densidad aparente se presentan en la **Figura 10**. En la zona apical la ρ varió linealmente entre 989 y 1250 kg m^{-3} , para la sección media la densidad estuvo en un rango de 1003 a 1182 kg m^{-3} y en lo referente a la zona base, la densidad se encontró entre 889 y 1093 kg m^{-3} . El modelo de predicción para esta variable en ápice fue: $\rho_{\text{Ápice}} = 4.46T + 874$, en la sección medio el modelo fue: $\rho_{\text{Medio}} = 2.99T + 946$ y para base $\rho_{\text{Base}} = 3.37T + 807$; los coeficientes de determinación fueron: 0.94 para ápice, 0.99 para medio y 0.95 para la base del espárrago.

Rodrigo y col (1998) reportan una densidad para espárrago de 960 kg m^{-3} , densidad que cae dentro de los rangos encontrados para las tres secciones estudiadas. Liang y col (1999) presentan en sus resultados una densidad de 1041 kg m^{-3} para espárrago, así como para otros vegetales como papa (1071 kg m^{-3}), pepino (994 kg m^{-3}) y zanahoria (950 kg m^{-3}). En sus resultados también analizaron el comportamiento de este parámetro en función de la humedad, para ello determinaron la densidad de rábano fresco y una muestra seca, obteniendo

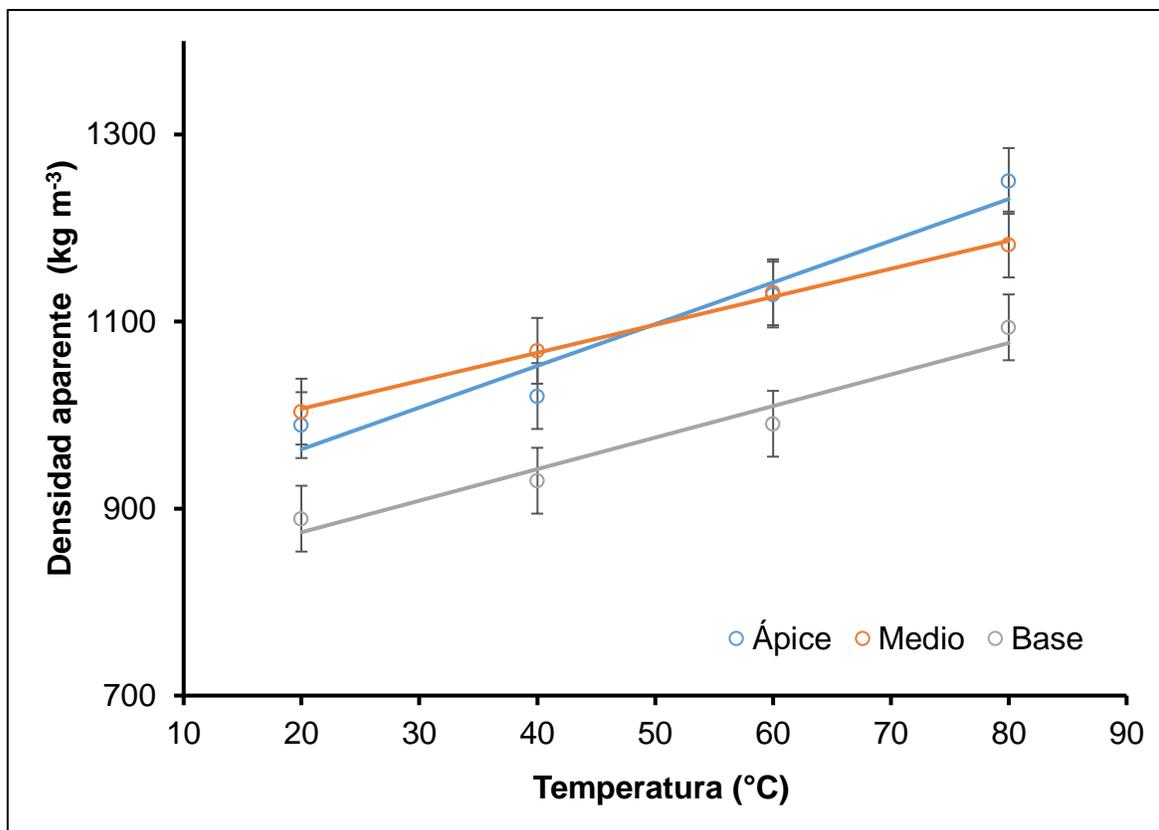


Figura 10. Densidad aparente en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura. (LSD = 70 kg m⁻³, $\alpha = 0.05$).

densidades de 994 y 850 kg m⁻³, respectivamente. Con ello es posible validar que el contenido de humedad es un factor que influye en la magnitud de densidad.

4 Difusividad térmica (α)

El comportamiento de la difusividad térmica en función de la temperatura en el ápice, medio y base de espárrago se presenta en la **Figura 11**. En ella se aprecia que la temperatura no tuvo un efecto significativo sobre dicha propiedad en el rango estudiado. La sección apical presentó difusividades térmicas entre 1.22×10^{-7} y $1.54 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. El rango de variación de esta propiedad para la sección medio fue de 1.30×10^{-7} a $1.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y en la base del espárrago de 1.39×10^{-7} a $1.46 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Vidaurre y Castañeda (2014) señalan que la mayoría de los datos de difusividad reportadas para alimentos se encuentran entre 1.0×10^{-7} y $2.36 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, dentro del rango de temperatura ambiente y las típicas de escaldado. Diversos productos alimenticios con humedades semejantes a las del espárrago reportadas por Rahman (2008), por ejemplo, zanahoria ($1.40 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), pepino ($1.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), fresa ($1.27 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) y tomate cherry ($1.48 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) poseen difusividades térmicas similares a las encontradas en el presente estudio.

Martens y col (2001) reportan una difusividad térmica de $1.59 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, estimada mediante una correlación con el contenido de humedad, la cual es similar a la determinada en este trabajo de investigación. Así como la reportada por Rodrigo y col (1998) de $1.76 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, que resulta ser ligeramente superior.

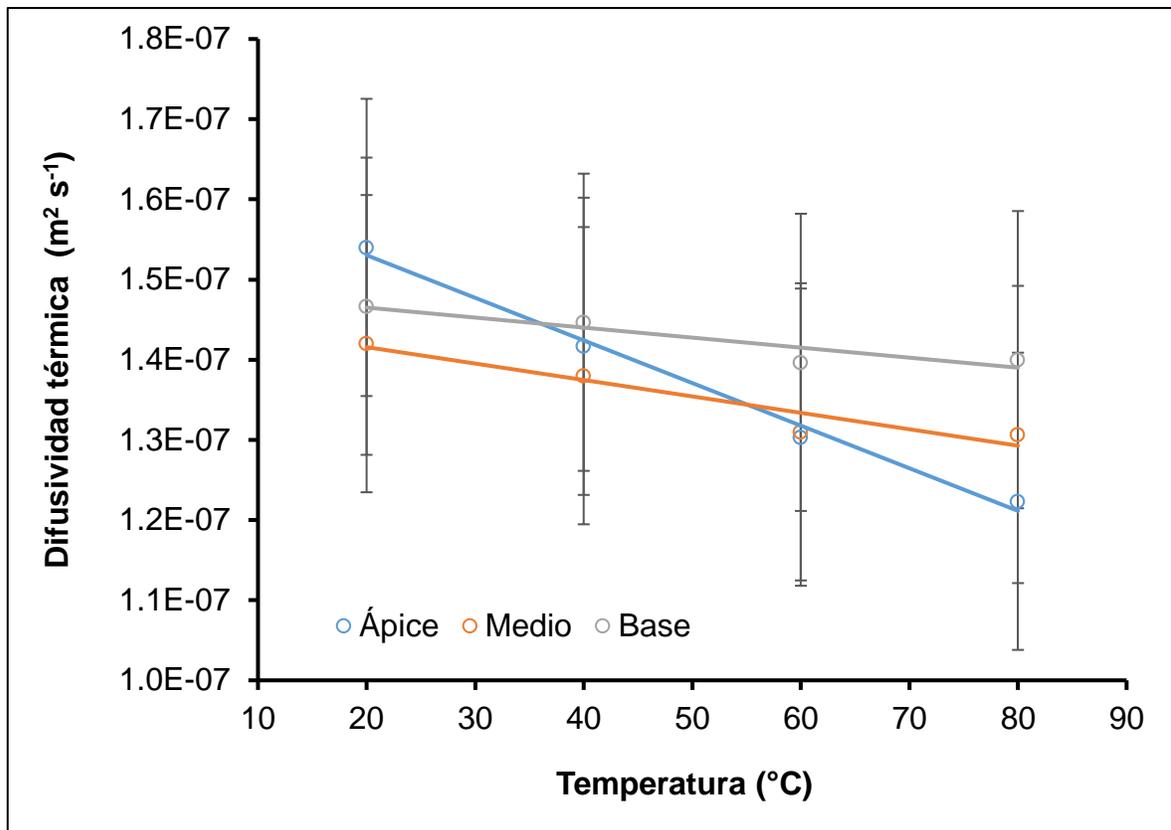


Figura 11. Difusividad térmica en ápice, medio y base de espárrago en función de la temperatura. (LSD = $3.7 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

La difusividad térmica indica la rapidez con la que el calor se propaga a través de un alimento durante el calentamiento o enfriamiento, esta propiedad depende básicamente de la composición del alimento y de la temperatura del proceso (Erdoğdu 2008).

F COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CALOR (h)

En las **Figuras 12** y **13** se observan los gráficos empleados para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor para las secciones ápice, medio y base durante el proceso de escaldado y enfriamiento, respectivamente. En el proceso de escaldado, el coeficiente convectivo fue de $394 \pm 43 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ($Bi = 0.004$), $507 \pm 26 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ($Bi = 0.007$) y $590 \pm 83 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ($Bi = 0.009$); que corresponden a las secciones ápice, medio y base, respectivamente. Los coeficientes convectivos encontrados para las tres secciones caen dentro del rango reportado por Manrique (2002), quien expone que el coeficiente convectivo de transferencia de calor en medio líquido y bajo condiciones de convección libre se encuentra entre 50 y $1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Martens y col (2001) obtuvieron un coeficiente convectivo de $214 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ durante la etapa de enfriamiento de brócoli, dicho coeficiente fue asumido como adecuado para el proceso de transferencia de calor en espárrago. Con ello lograron obtener buenas simulaciones de transferencia de calor y, a su vez, fueron útiles para predecir la inactivación de Peroxidasa. La magnitud de este coeficiente es similar al encontrado en este estudio para el calentamiento en la sección apical. También existe similitud entre los coeficientes de transferencia encontrados por Vidaurre-Ruiz y Salas-Valerio (2016), determinados en cubos de papa y calabaza de diferentes tamaños a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, los

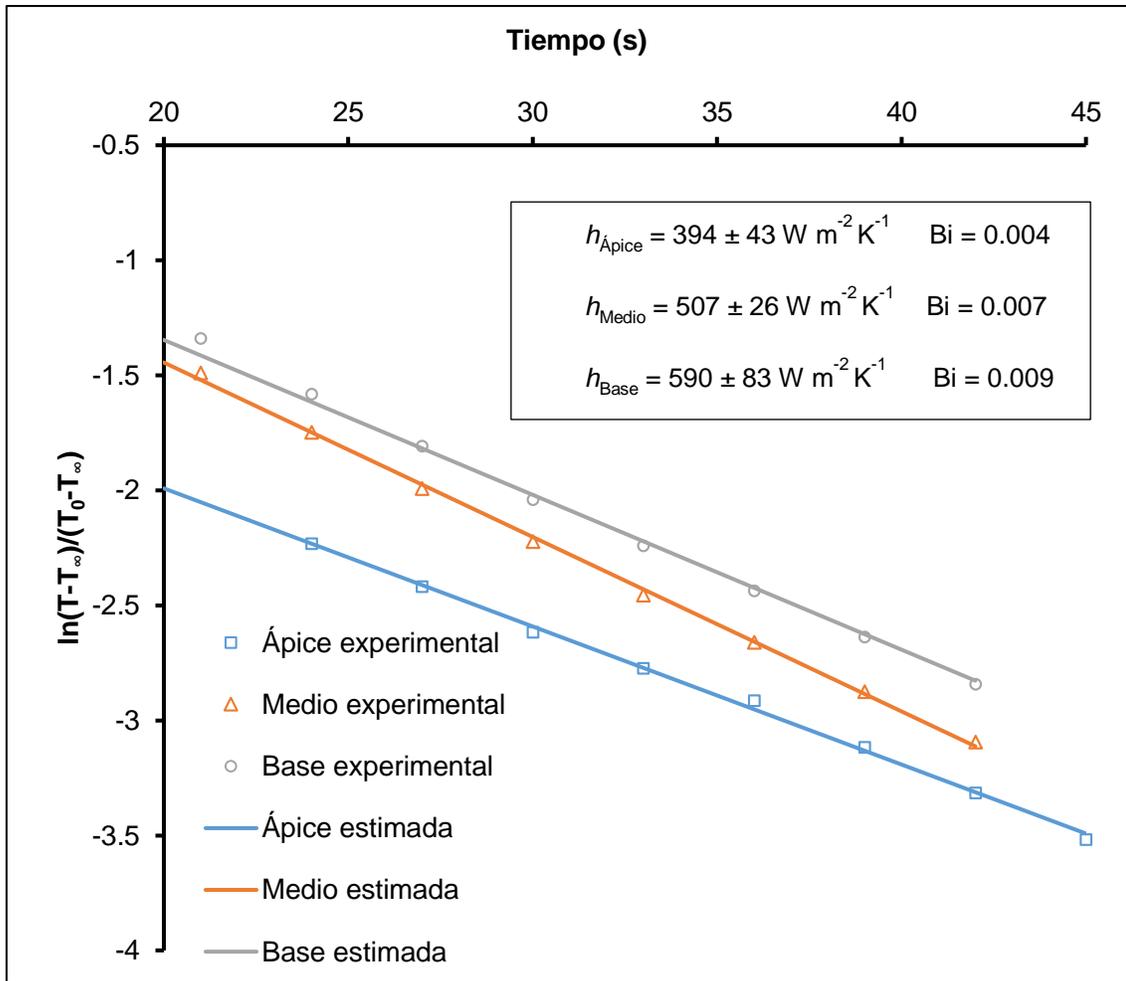


Figura 12. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el proceso de escaldado ($75.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$) para las secciones: ápice, medio y base.

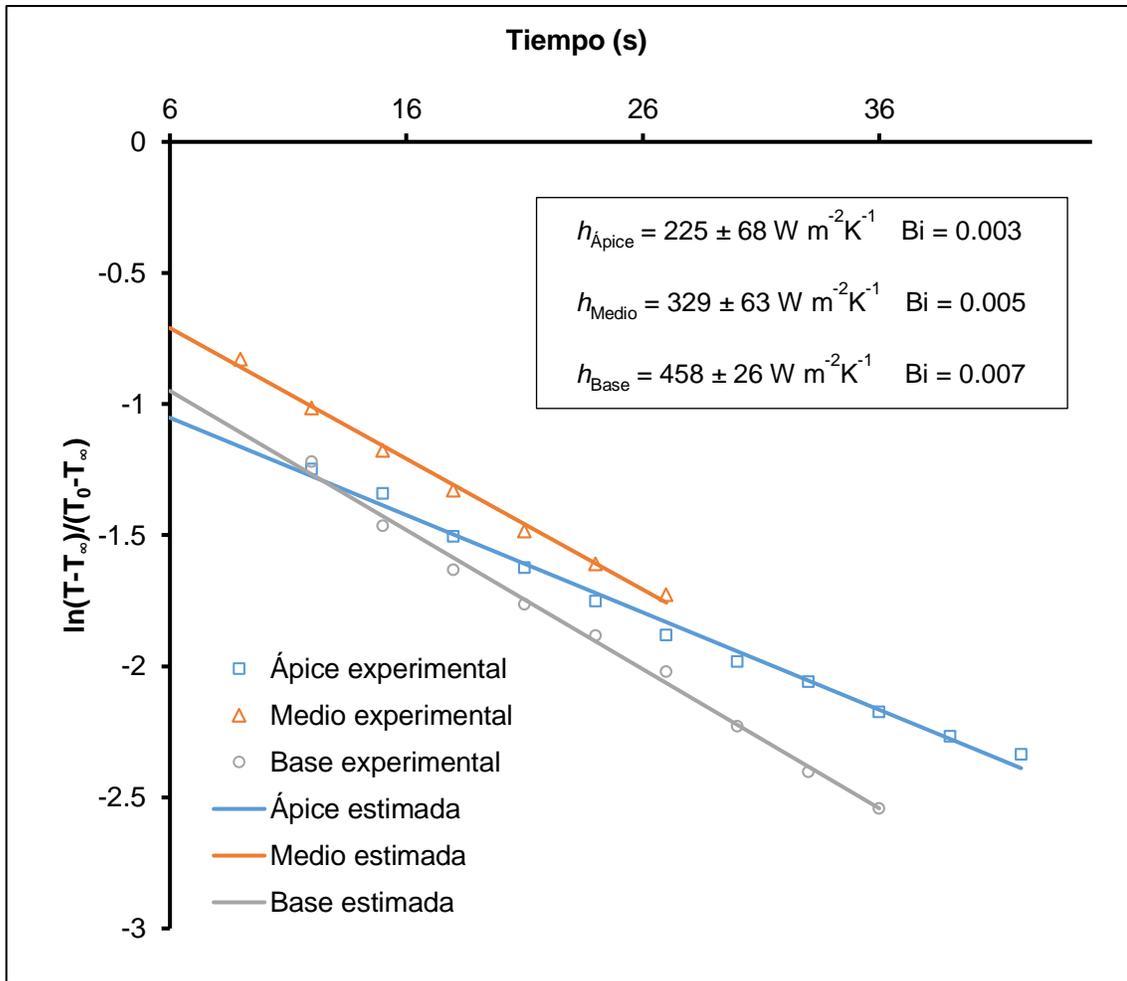


Figura 13. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) durante el proceso de enfriamiento (4 °C) para las secciones: ápice, medio y base.

coeficientes variaron entre 655 y 691 $W m^{-2} K^{-1}$. En sus resultados se puede observar que el coeficiente convectivo sufre un incremento al aumentar también el tamaño de los cubos. Este comportamiento también se observa en el presente trabajo, ya que el coeficiente de transferencia resulta ser mayor en la base; zona que posee mayor diámetro.

Otro estudio que confirma la dependencia del coeficiente convectivo con las dimensiones es el realizado por Fasina y Fleming (2001), quienes encontraron que el coeficiente convectivo dependía del tamaño de cilindros de pepino y no existieron diferencias al variar la temperatura. Avilez-Montes y col (2016) reportan coeficientes convectivos de transferencia de calor para el proceso de escaldado de mora de castilla a 70, 80 y 90 °C de 504.5, 382.5 y 567 $W m^{-2} K^{-1}$, respectivamente. Los cuales resultan ser similares a los determinados en este trabajo.

Por otro lado, para el proceso de enfriamiento el coeficiente convectivo fue de $225 \pm 68 W m^{-2} K^{-1}$ ($Bi = 0.003$), $329 \pm 63 W m^{-2} K^{-1}$ ($Bi = 0.005$) y $458 \pm 26 W m^{-2} K^{-1}$ ($Bi = 0.007$); en ápice, medio y base, respectivamente. Estos coeficientes resultan ir en aumento desde el ápice a la base del espárrago. Además, se observa que, para una misma sección, en la etapa de enfriamiento este parámetro es menor que el determinado durante el escaldado.

La diferencia entre las características de los productos trabajados, los métodos utilizados para la medición de las temperaturas y solución de las ecuaciones de transferencia de calor pueden ser las razones que expliquen las discrepancias que existen entre los coeficientes convectivos encontrados en este trabajo y los reportados en la literatura (Alvis y col 2009).

G SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

1 Análisis con elemento finito

En la **Figura 14** se muestran las historias de temperaturas durante el escaldado e hidrogenfriado de las diferentes secciones de espárrago analizadas. Los termopares se ubicaron a 0.04, 0.102 y 0.178 m desde el extremo de la base y a una profundidad de 0.001, 0.002 y 0.001 m en la región base, medio y ápice, respectivamente. Se aprecia que el ápice manifiesta un calentamiento más rápido, esto puede ser atribuido a que esta sección posee una mayor conductividad térmica y menor espesor, lo que facilita la penetración de calor. En el mismo orden de ideas se esperaría que la sección base fuera la que exhibiera un calentamiento más lento, esta disyuntiva puede ser atribuida al hecho de que el termopar en esta sección quedó a una profundidad mayor, a pesar de los esfuerzos por conseguir una misma profundidad para los tres termopares.

En la **Figura 15** se presenta el modelo tridimensional del espárrago creado a través de elemento finito con los puntos alimentados basados en las medidas de un espárrago real. En dicho modelo se observa que la base es la zona de mayor diámetro y que éste disminuye a medida que se acerca al ápice. Tras introducir al MEF un tamaño de elemento de 0.001 m, éste mapeó de manera libre los nodos en el modelo tridimensional, dando un total de 52,316 nodos y 34,802 elementos en la sección apical; 65,818 nodos y 45,000 elementos en la sección medio y 85,572 nodos y 58,951 elementos en la base. Además, en la **Figura 16** se encuentran los perfiles de temperatura de las diferentes secciones de espárrago estudiadas. En ellos se distinguen coloraciones que van desde el rojo, que denota las temperaturas más elevadas, y azul que representa temperaturas más bajas. La propagación del color rojo

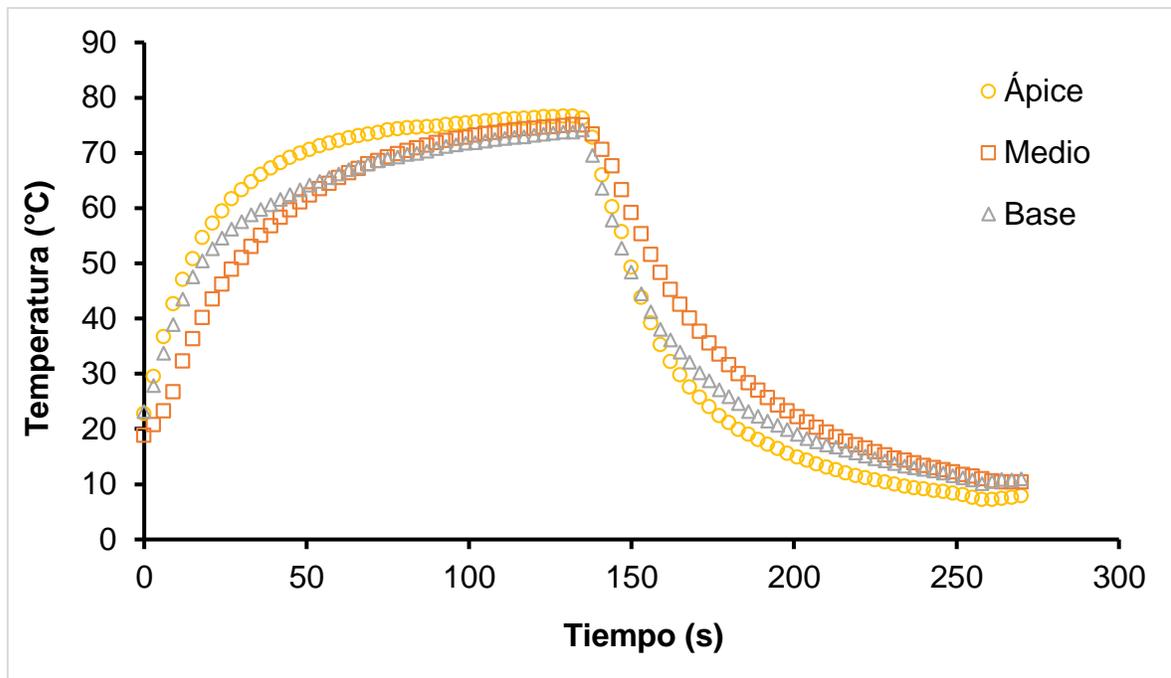


Figura 14. Historias de temperaturas experimentales en ápice, medio y base de espárrago durante el escaldado (75.9 °C) e hidrogenfriado (4 °C).

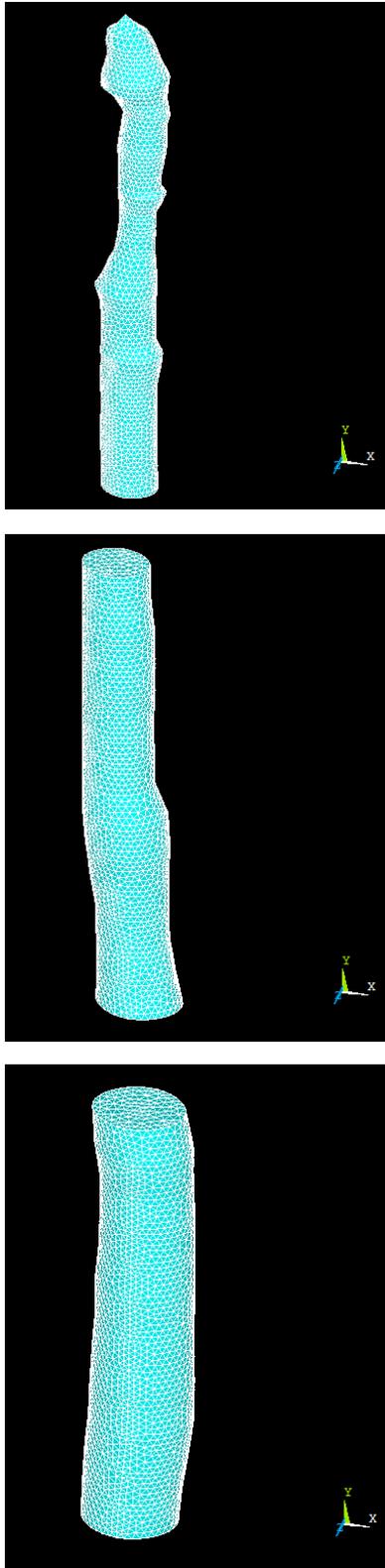


Figura 15. Modelo tridimensional de las secciones ápice, medio y base de espárrago mediante el Método de Elemento Finito (MEF).

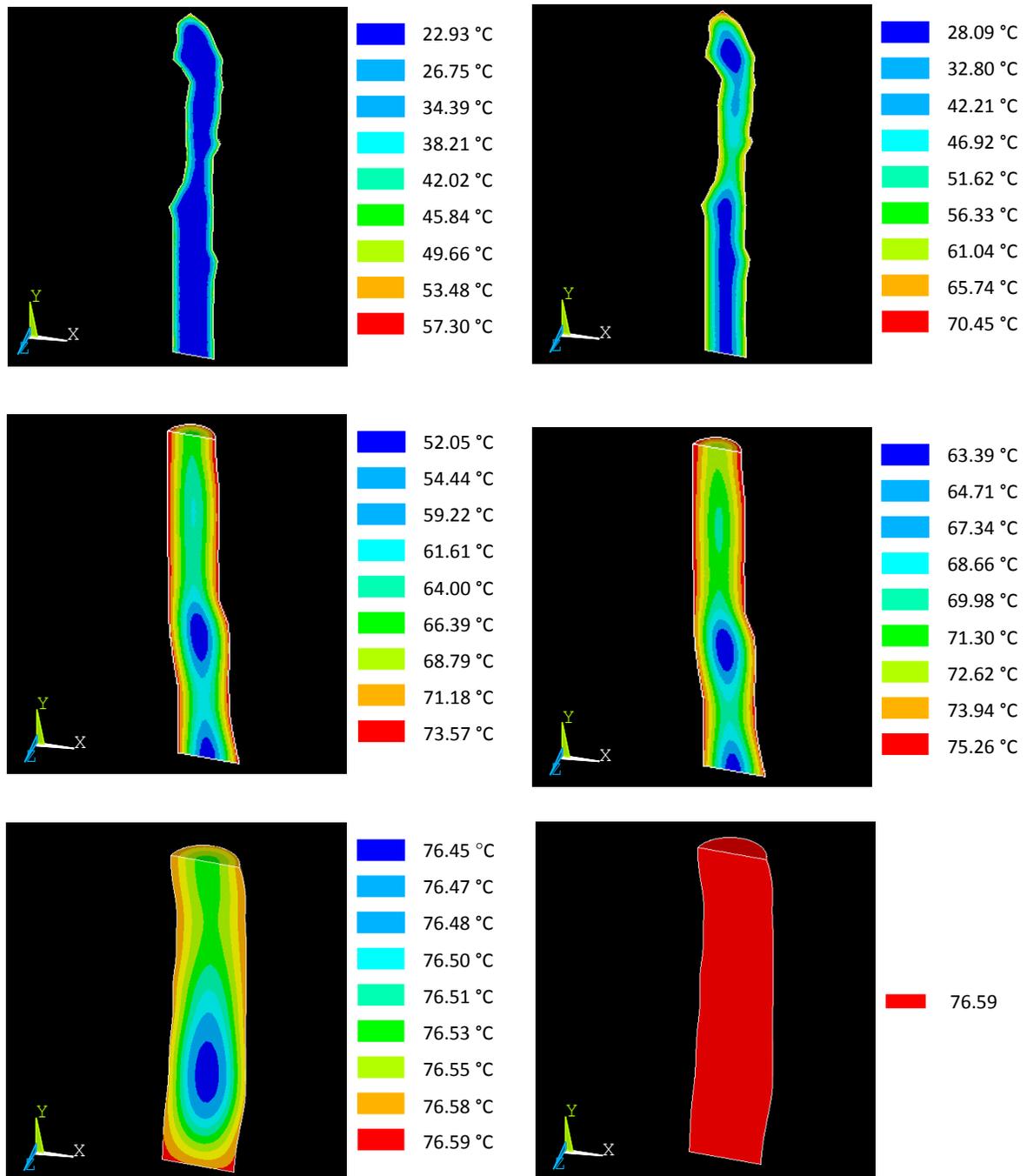


Figura 16. Perfiles de temperatura de las secciones: ápice (3 y 15 s), medio (60 y 90 s) y base (375 y 720 s) de espárrago, utilizando el Método de Elemento Finito (MEF).

desde la superficie hasta el interior en las distintas secciones representa el aumento de temperatura ocasionado por la penetración del calor durante el escaldado.

El Método de Elemento Finito (MEF) permitió obtener perfiles de temperatura durante las etapas de calentamiento y enfriamiento de espárrago, con estos fue posible ubicar el punto más lento de calentamiento/enfriamiento, el cual se encuentra a 2.5 cm de la base. Este hecho puede ser atribuido a que esta sección es la que presenta mayor espesor. A pesar de que en la base la magnitud del coeficiente convectivo es mayor que en las otras dos secciones, lo que pudiera significar una mayor transferencia de calor desde el medio, resulta que las propiedades termofísicas de esta sección no facilitan este proceso en el interior del material de la misma manera que en el ápice y medio. La densidad en la base es menor, al igual que su humedad, con ello se puede deducir que mucho del espacio se encuentra ocupado por aire y este material posee una baja conductividad térmica, hecho que se corrobora con las conductividades térmicas medidas que, en efecto, resulta ser menor en la base: por todo esto es que el centro térmico crítico se encuentra en esta sección. La sección ápice fue la que presentó los mayores gradientes de temperatura.

H VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Las historias de temperatura obtenidas mediante el Método de Elemento Finito (MEF), en las tres secciones del espárrago, se aprecian en la **Figura 17**. Para la sección apical, se observan las historias de temperatura calculadas mediante solución analítica considerando propiedades constantes a 20, 40, 60 y 80 °C; los coeficientes de determinación obtenidos al comparar con la historia experimental fueron 0.994, 0.981, 0.990 y 0.962, respectivamente. Al comparar la historia estimada mediante elemento

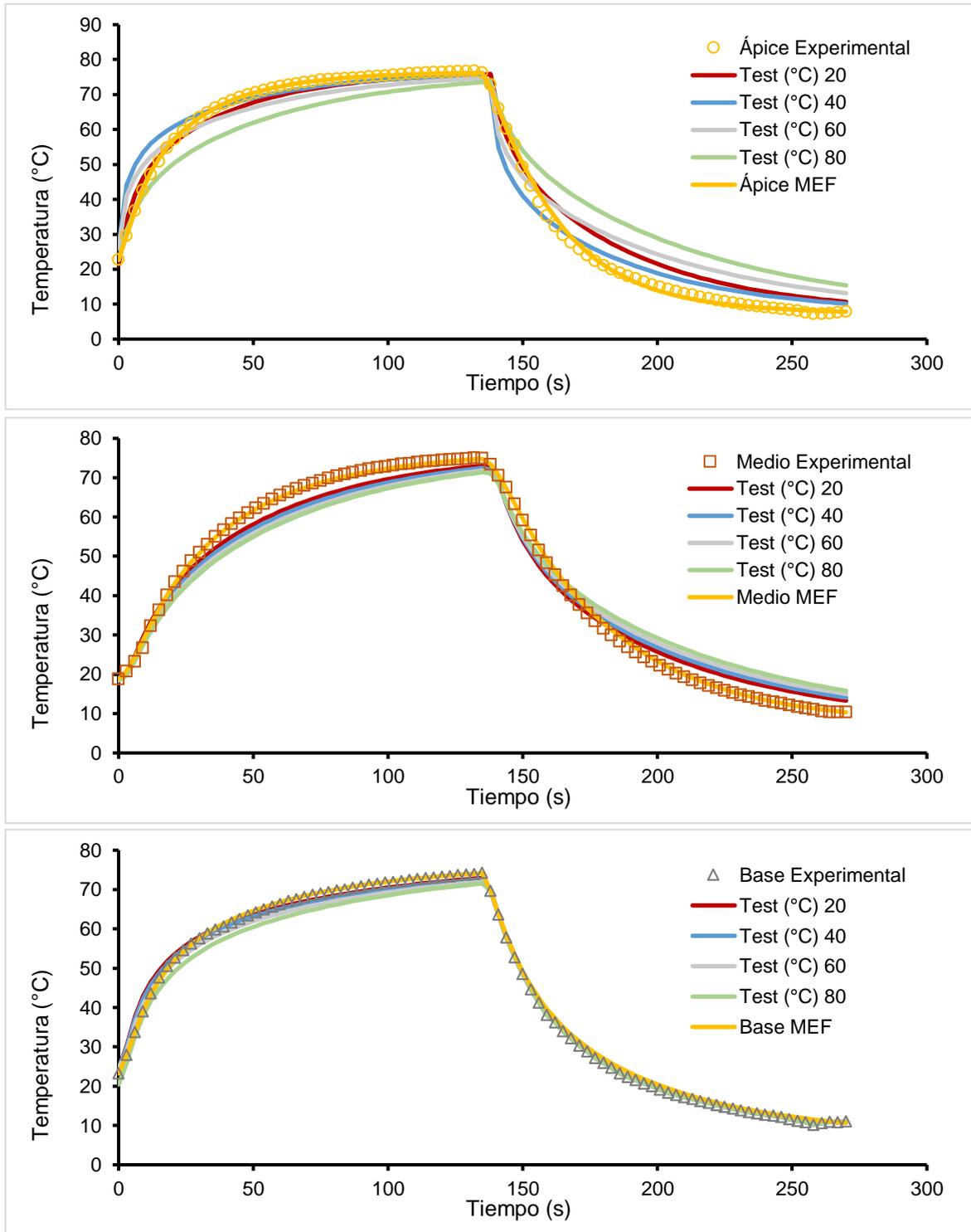


Figura 17. Historias de temperatura estimadas en ápice, medio y base de espárrago empleando el Método de Elemento Finito (MEF).

finito, usando propiedades termofísicas dependientes de la temperatura, contra la experimental, el ajuste resulta ser mejor ($R^2 = 0.999$). En la sección medio, al contrastar las historias calculadas con la solución analítica con propiedades termofísicas constantes a 20, 40, 60 y 80 °C contra la experimental, los coeficientes de determinación fueron: 0.996, 0.994, 0.990 y 0.985, respectivamente; en cambio, el ajuste de la historia predicha empleando elemento finito con propiedades termofísicas variables y datos experimentales resulta ser mejor ($R^2 = 0.999$). En la sección base, los coeficientes de determinación entre las historias de temperatura calculadas con la solución analítica con propiedades termofísicas constantes a 20, 40, 60 y 80 °C fueron 0.998, 0.998, 0.999 y 0.998, respectivamente. El ajuste resultó mejor ($R^2 = 0.999$) al comparar la historia simulada mediante elemento finito usando propiedades dependientes de la temperatura. Las predicciones realizadas mediante el análisis con elemento finito se ajustan de forma adecuada a los datos experimentales, e incluso mejor que las predicciones hechas mediante la solución analítica. Tal hecho evidencia que la simulación con elemento finito es buena y que da seguridad en los pronósticos hechos al momento de aplicar el método en geometrías que no son regulares.

En cuanto a la solución analítica, se puede rescatar que, de las historias de temperatura predichas realizadas con dicha solución analítica en las secciones ápice y medio, la que emplea propiedades termofísicas a 20 °C resultan dar un mejor ajuste. Esta situación puede deberse a la temperatura del medio durante el hidrogenado y a la proximidad a la superficie del punto simulado. Puesto que la posición radial alimentada a la solución analítica es de 0.001 y 0.002 m en el ápice y medio, respectivamente, observamos que este punto se encuentra cercano a la superficie, por

lo que rápidamente se verá afectado por los cambios en la temperatura del medio. Además, dado que las historias de temperatura se encuentran dentro del rango de 4 y 75.9 °C (temperatura de hidrogenfriado y óptima de escaldado), que la temperatura inicial del espárrago se encuentra cercana a los 20 °C y que el tiempo tanto de escaldado (2.1 min) e hidrogenfriado (2 min) son similares, se puede argumentar que 20 °C funge como una temperatura promedio durante todo el proceso y por ende, es al emplear estas propiedades en la solución analítica que se obtiene un mejor ajuste.

Rodriguez (2005), llevó a cabo una simulación mediante el MEF para predecir la distribución de temperaturas durante el proceso de conducción de calor de alimentos de formas irregulares complejas, como turiones de espárrago, floretes de brócoli, y camarones. Los resultados obtenidos demostraron un buen ajuste entre los perfiles experimentales y los simulados. Iribe-Salazar y col (2015) indicaron que las historias de temperatura de escaldado e hidrogenfriado de floretes de brócoli estimadas a través del elemento finito ajustaron apropiadamente a los resultados experimentales, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.997.

VII CONCLUSIONES

Las magnitudes de los parámetros fisicoquímicos, fitoquímico, nutrimental y enzimático de espárrago fresco concuerdan con las reportadas en la literatura.

Los modelos de predicción para retención de firmeza, diferencia total de color, retención de compuestos fenólicos, ácido ascórbico y actividad enzimática durante el proceso de escaldado de espárrago fueron adecuados y reproducibles. Esto permite realizar predicciones satisfactorias dentro del intervalo de estudio. Las condiciones de temperatura y tiempo óptimas para el escaldado de turiones de espárrago fueron 75.9 °C y 2.1 min. No obstante haber seleccionado las secciones que presentaron mayores cambios durante el proceso de escaldado, en estas condiciones óptimas se obtuvieron buenos atributos de calidad: diferencia total de color (10.3), retenciones de firmeza (85.3 %), compuestos fenólicos (44.6 %) y de ácido ascórbico (41.2 %).

El proceso de escaldado tuvo un efecto significativo sobre los parámetros fisicoquímicos, fitoquímico, nutrimental y enzimático, a excepción de la humedad.

Las propiedades termofísicas mostraron una dependencia de la temperatura en las tres secciones analizadas dentro del rango estudiado, excepto la difusividad térmica. El coeficiente convectivo durante el escaldado fue mayor al correspondiente al proceso de enfriamiento. Las simulaciones analíticas y con elemento finito se ajustaron satisfactoriamente a las historias experimentales ($R^2 > 0.96$).

El Método del Elemento Finito generó predicciones más precisas de los perfiles e historias de temperatura que la solución analítica para cilindro durante el escaldado de turiones de espárrago. Esto debido a que esta solución analítica asume propiedades

termofísicas constantes para un sistema con geometría regular. Sin embargo, las propiedades termofísicas cambian con la temperatura y la geometría de los turiones de espárrago es irregular.

El análisis de la transferencia de calor con base en las historias y gradientes de temperatura durante el proceso de escaldado de turiones de espárrago bajo condiciones optimizadas reveló que el centro térmico crítico se encuentra en la sección base, misma en la que el proceso de escaldado tuvo menor efecto sobre los atributos fitoquímico y nutrimental.

IX BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar CN, Reyes M, De la Garza H, Contreras JC. 1999. Aspectos bioquímicos de la relación entre el escaldado TB-TL y la textura de vegetales procesados. *Revista de la Sociedad Química de México* 43:54-62.
- Ahmed J, Shivhare US, Singh P. 2004. Colour kinetics and rheology of coriander leaf puree and storage characteristics of the paste. *Food Chemistry* 84(4):605-611.
- Alvarado JDD, Aguilera JM. 2001. Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos. 1^{ra} Edición. Zaragoza: Acribia. 410 p.
- Alvis A, Cortés LE, Páez M. 2009. Transferencia de calor y materia durante la fritura de trozos de ñame (*Dioscórea alata*). *Información Tecnológica* 20(1):99-109.
- Amin I, Lee W. 2005. Effect of different blanching times on antioxidant properties in selected cruciferous vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85(13):2314-2320.
- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL. 18a ed. Estados Unidos de América: Association of Official Analytical Chemists.
- Avilez-Montes Y, Romero-Martinez 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 MR , García E. 1997. Simulación y análisis de modelos estocásticos. México: McGraw Hill. 282 p.

- Bacio LV. 2007. Optimización multi-objetivo en el problema de metodología de superficie multi-respuesta (Tesis de Maestría). Guanajuato, Gto.: Centro de Investigación en Matemáticas, A. C.. 149 p.
- Baş D, Boyacı İH. 2007. Modeling and optimization I: usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 78(3):836-845.
- Brewer MS, Begum S. 2003. Effect of microwave power level and time on ascorbic acid content, peroxidase activity and color of selected vegetables. *Journal of Food Processing Preservation* 27:411-426.
- Cantwell, M. 2013. Espárragos verdes: recomendaciones para mantener la calidad poscosecha. California, U.S.: Universidad de California. Disponible de: http://postharvest.ucdavis.edu/Commodity_Resources/Fact_Sheets/Datastores/Vegetables_English/index.cfm?uid=2&ds=799. Consultado en Enero del 2020.
- Califano AN, Calvelo A. 1983. Heat and mass transfer during the warm water blanching of potatoes. *Journal of Food Science* 48:220-225.
- Carranza-Saavadra D, Méndez-Reyes DA, Váquiro HA, Solanilla JF. 2014. Cinética de degradación térmica del ácido ascórbico en jugo de curuba (*Passiflora tripartita* variedad mollisima). *Revista de la Facultad Nacional Agraria de Medellín* 67(2):165-167.
- Carslaw HS, Jeaguer JC. 1959. *Conduction of Heat in solids*. 2^{da} Edición. Nueva York: Oxford University Press. 520 p.
- Cengel YA. 2007. *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. 3^a Edición. México: McGraw Hill. 901 p.

- Cháfer M, González-Martínez C, Fernández B, Pérez L, Chiralt A. 2003. Effect of blanching and vacuum pulse application on osmotic dehydration of pear. *Food Science and Technology International* 9:321-328.
- Chuah AM, Lee YC, Yamaguchi T, Takamura H, Yin LJ, Matoba T. 2008. Effect of cooking on the antioxidant properties of coloured peppers. *Food Chemistry* 111(1):20-28.
- Claeys WL, Schmit JF, Bragard C, Maghuin-Rogister G, Pussemier L, Schiffers B. 2011. Exposure of several belgian consumer groups to pesticide residues through fresh fruit and vegetables consumption. *Food Control* 22:508-516.
- Cuastumal HG, Valencia BL, Ordóñez-Santos LE. 2016. Efectos de los tratamientos térmicos en la concentración de vitamina C y color superficial en tres frutas tropicales. *Revista Lasallista de Investigación* 13(1):85-93.
- Davis WR. 1980. Hot wire method for the measurement of the thermal conductivity of refractory materials. *British Ceramic Transactions* 79:231-253.
- Del Pozo A, González MI. 1999. El cultivo del Espárrago. Chillán, Chile: Instituto de investigaciones agropecuarias Ministerio de agricultura: 212 p.
- Derringer G, Suich R. 1980. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology* 12(4):214-219.
- Dolz Z. 2008. Evaluación de la calidad de fruto de manzano: estudio de métodos no destructivos de análisis [Tesis de Licenciatura]. Zaragoza, España: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia de Doña Godina. 66 p.
- Dorantes-Álvarez L, Jaramillo-Flores E, González K, Martínez R, Parada L. 2011. Blanching peppers using microwaves. *Procedia Food Science* 1:178-183.

- Dürüst N, Sümergen D, Dürüst YY. 1997. Ascorbic acid and element contents of foods of Trabzon (Turkey). *Journal Agricultural and Food Chemistry* 45:2085-2087.
- Encalada JC. 2015. Determinación de la máxima retención del color verde de espárragos (*Asparagus officinalis* L.) en conservas durante el tratamiento térmico [Tesis de Licenciatura]. Piura, Perú: Universidad Nacional de Piura. 104 p.
- Erdoğu F. 2008. A review simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient. *Journal of Food Engineering* 86:453-459.
- Espinoza JY, López AR. 2018. Evaluación de las propiedades funcionales y fisicoquímicas de una sopa instantánea formulada a partir de tallos de espárrago verdes (*Asparagus officinalis*). Lambayeque, Perú: Universidad Nacional "Pedro Ruíz Gallo". 129 p.
- Fan R, Yuan F, Wang N, Gao Y, Huang Y. 2014. Extraction and analysis of antioxidant compounds from the residues of *Asparagus officinalis* L.. *Journal of Food Science and Technology* 52(5):2690-2700.
- [FAOSTAT] Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2017. Disponible de: <http://www.fao.org>. Consultado en Enero del 2020.
- Fasina OO, Fleming HP. 2001. Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching. *Journal of Food Engineering* 47:203-210.
- Firpo IT, Rotondo R, Drincovich F, Chaves A, López F, Cointry E, García SM. 2007. Caracterización de aspectos de calidad a cosecha de cinco híbridos de espárrago, bajo dos sistemas de manejo. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNR* 11:061-070.

- Frías JM, Oliveira JC. 2001. Kinetics models of ascorbic acid thermal degradation during hot air drying of maltodextrin solutions. *Journal of Food Engineering* 47:255-262.
- Fuentealba RA. 2004. Estudio de la variación de la firmeza en espárragos verdes (*Asparagus officinalis* L.) sometidos a diversos tratamientos de escaldado [Tesis de Licenciatura]. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. 78 p.
- Ganthavorn C, Nagel C, Powers J. 1991. Thermal inactivation of asparagus lipoxygenase and peroxidase. *Journal of Food Science* 56:47-49.
- Geankoplis CJ. 2006. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4ta Edición. México: CECSA Editorial. 1034 p.
- Gobbo-Neto L, Lopes NP. 2007. Plantas medicinais: fatores de influencia no conteúdo de metabólitos secundários. *Química Nova* 30(2):374-381.
- 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(4):574-581.
- González ND, Gely MC, Pagano MA .2016. Influencia del método de cocción sobre el color y los antioxidantes de coliflor. *La Alimentación Latinoamericana* 319:56-62.
- Hemmler D, Roullier-Gall C, Marshall JW, Rchlik M, Taylor AJ, Shmitt-Kopplin P. 2018. Insights into the chemistry of non-enzymatic browning reactions in different ribose-amino acid model systems. *Scientific Report* 8(1).
- Incropera FP. 1999. Fundamentos de transferencia de calor. 4ª Edición. México: PRENTICE HALL. 912 p.
- Iribe-Salazar R, Caro-Corrales JC, Hernández-Calderón O, Zazueta-Niebla Jorge, 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.
- Jaiswal AK, Gupta S, Abu-Ghanman N. 2012. Kinetic evaluation of colour, texture, polyphenols and antioxidant capacity of irish york cabbage after blanching treatment. *Food Chemistry* 131(1):63-72.
- Khoo HE, Prasad KN, Kong KW, Jiang Y, Ismail A. 2011. Carotenoids and their isomers: color pigments in fruits and vegetables. *Molecules* 16(2):1710-1738.
- Latorre VL, Pantoja CA. 2013. Evaluación de tratamientos térmicos para inactivación de enzimas en jugo de fique (*Furcraea gigantea Vent.*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 11:113-122.
- Laurindo JB, Carciofi BAM, Silva RR, Dammemhauer CE, Hense H. 2010. Evaluation of the effects of water agitation by air injection and water recirculation on the heat transfer coefficients in immersion cooling. *Journal of Food Engineering* 96:59-65.
- Levenspiel O [Costa López J]. 1998. Flujo de fluidos e intercambio de calor. Edición en español. Impreso en España: REVERTÉ EDICIONES, S.A. DE C.V.. 369 p.
- Liang X-G, Zhang Y, Ge X. 1999. The measurement of thermal conductivities of solid fruits and vegetables. *Measurement Science and Technology* 10:N82-N86.
- Lipton W. 1990. Postharvest biology of fresh asparagus. En: Jules J, editora. *Horticultural Reviews*. Vol.12. Portland, Oregon: Editorial Board. p 69-149.
- Li W, Zhang M, Han-qing Y. 2006. Study on hypobaric storage of green asparagus. *Journal of Food Engineering* 73:225-230.
- Loayza V. 2006. Espárragos: Cultivo, Producción e Industrialización. Ediciones Ripalme. Lima, Perú.

- López NM. 2003. Influencia de la concentración enzimática inicial en la cinética de desactivación térmica de peroxidasa comercial. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. 77 p.
- Manrique V. 2002. Transferencia de Calor. 2ª ed. México: OXFORD. 306 p.
- 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.
- Martens M, Scheerlinck N, De Balie N, De Baerdemaeker J. 2001. Numerical model for the combined simulation of heat transfer and enzyme inactivation kinetics in cylindrical vegetables. *Journal of Food Engineering* 47:185-193.
- Mastropascua L, Tanzarella P, Paciolla C. 2016. Effects of postharvest light spectra on quality and health-related parameters in green *Asparagus officinalis* L.. *Postharvest Biology and Technology* 112:143-151.
- Mena P, Martí N, Saura D, Valero M, García-Viguera C. 2012. Combinatory effect of thermal treatment and blending on the quality of pomegranate juices. *Food and Bioprocess Technology* 6(11):3186-3199.
- Mendoza-Corvis FA, Hernández EJ, Ruiz LE. 2015. Efecto del escaldado sobre el color y cinética de degradación térmica de la vitamina C de la pulpa de mango de hilacha (*Magnifera indica* var *magdalena river*). *Información Tecnológica* 26(3):9-16.
- 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 & Technology* 41(7):727-736.

- Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C, Camacho-Hernández IL, Rouzaud-Sandez O. 2002. Optimisation 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.
- Millán S. 2014. Propagación in vitro de espárrago (*Asparagus officinalis* L.) por organogénesis directa a partir de yemas del rizoma [Tesis de maestría]. Hermosillo, Sonora: Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C..64 p.
- Mohsenin NN. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties. 2^{da} Edición. New York: Breach science publishers. 891 p.
- 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.
- Morales-Blancas EF, Chandia VE, Cisneros-Ceballos L. 2002. Thermal inactivation kinetics of peroxidase and lipoxygenase from broccoli, green asparagus and carrots. *Food Chemistry and Toxicology* 67:146-154.
- 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* 10:69-76.

- Murakami EG, Sweat VE, Sastry SK, Kolbe E. 1996. Analysis of various design and operating parameters of the thermal conductivity probe. Reporte del NC-136 Ad Hoc Committee of the thermal conductivity probe.
- Myers R, Montgomery DC. 1971. Response surface methods. Allyn-Bacon: Boston, MA, USA.
- Nisha P, Singhal RS, Pandit AB. 2006. Kinetic modelling of texture development in potato cubes (*Solanum tuberosum L.*) green gram whole (*Vigna radiate L.* and red gram splits (*Cajanus cajan L.*). Journal of Food Engineering 76(4):524-530.
- 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.
- Ornstrup O. 1997. Biotechnological methods in asparagus breeding. Asparagus Research Newsletter 14:1-25.
- Palma A, Schirra M, D'Aquino S. 2015. Effect of film packaging and storage temperatura on physical and chemical changes in fresh-cut green asparagus. Advances in Horticultural Science 29(2):133-140.
- Pinchao YA, Andrade JC, Osorio O. 2016. Procesamiento de Arvejas (*Pisum sativum L.*). Parte 4: Optimización del proceso de escaldado de Arvejas (*Pisum sativum L.*) variedades sureña y andina en base a la inactivación de peroxidasa. Información Tecnológica 24(4): 43-52.
- Rahman MS. 2008. Food properties handbook. 2^a ed. Boca Ratón: CRC Press. 838 p.
- Ramos GE. 2013. Diseño de un congelador continuo individual IQF con una capacidad de 200 kg/hr de espárragos [Tesis de Licenciatura]. Lima, Perú: Pontifica Universidad Católica del Perú. 84 p.

- Rapusas RS, Driscoll RH. 1995. Thermophysical properties of fresh and dried white onions slices. *Journal of Food Engineering* 24: 149-174.
- Ribardo C, Allen TT. 2003. An alternative desirability function for achieving 'six sigma' quality. *Quality and Reliability Engineering International* 19:227-240.
- Ríos D, Ríos S, Jiménez JM. 2000. Simulación: métodos y aplicaciones. 2^{da} Edición. Bogotá: Alfaomega. 371 p.
- Rodrigo C, Mateu A, Alvarruiz A, Chinesta F, Rodrigo M. 1998. Kinetic parameters for thermal degradation of green asparagus texture by unsteady-state method. *Journal of Food Science* 63:126-129.
- Rodríguez C, Celeste MA, Gómez J, Cerón A. 2017. Efecto del tratamiento térmico en compuestos bioactivos y propiedades fisicoquímicas en brócoli. *Jóvenes en la Ciencia* 3(2):95-100.
- Rodríguez CP. 2005. Simulación computacional de procesos de conducción de calor en alimentos de formas irregulares complejas [Tesis de Licenciatura]. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. 207 p.
- Sablani S, Rahman M. 2003. Uso de redes neuronales para predecir la conductividad térmica de los alimentos en función del contenido de humedad, la temperatura y porosidad aparente. *Food Research International* 36:617-623.
- [SAGARPA]. 2020. Se triplica la producción de espárrago en México en solo una década. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en www.sagarpa.com.mx. Consultado en Enero de 2020.
- Sahin S, Samnu S. 2009. Propiedades físicas de los alimentos. 1^{ra} Edición. Zaragoza: Acribia S.A. 316 p.

- Sánchez-Chávez W, Cortez-Arredonde J, Solano-Cornejo M, Vidaurre-Ruiz J. 2015. Cinética de degradación térmica de betacianinas, betaxantinas y vitamina C en una bebida a base de jugo de remolacha (*Beta vulgaris* L.) y miel de abeja. *Scientia Agropecuaria* 6(2):111-118.
- Schmalko ME, Alzamora SM. 2001. Color, chlorophyll, caffeine, and wáter content variation during yerba maté processing. *Drying Technology: An International Journal* 19(3):599-610.
- Severini C, Baiano A, Pilli TD, Carbone B, Derossi A. 2005. Combined treatments of blanching and dehydration: study on potato cubes. *Journal Food Engineering* 68:289-296.
- [SIAP]. 2020. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado en Enero del 2020.
- Slatnar A, Mikulic-Petkovsek M, Stampar F, Veberic R, Horvat J, Jakse M, Sircelj H. 2018. Game of tones: sugars, organic acids, and phenolics in green and purple asparagus (*Asparagus officinalis* L.) cultivars. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 42:55-56.
- Soobrattee MA, Neergeen VS, Luximon-Ramma A, Aruoma OI, Bahorun T. 2005. Phenolic as potential antioxidant therapeutic agents: mechanism and actions. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 579:200-213.
- Soysal C, Soylemez Z. 2005. Kinetics and inactivation of carrot peroxidase by heat treatment. *Journal of Food Engineering* 68(3):349-356.
- Sweat VE. 1974. Experimental values of thermal conductivities of selected fruits and vegetables. *Journal of Food Science* 39:1080-1083.

- [USDA]. 2016. Food composition database. Disponible en www.usda.gov. Consultado en Abril del 2018.
- Véliz EO. 2018. Capacidad antioxidante y compuestos fenólicos durante el procesamiento de espárrago blanco (*Asparagus officinalis*) encurtido por método directo [Tesis de Maestría]. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. 130 p.
- Vidaurre J, Castañeda J. 2014. Determinación de los parámetros de transferencia de calor durante el calentamiento del loche (*Cucurbita moschata Duchesne*) utilizando soluciones numéricas y analíticas. Rev. Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación 1(2):94-105.
- Vidaurre-Ruiz JM, Salas-Valerio WF. 2016. Modeling heat transfer during blanching of cubic particles of lonche (*Cucurbita Moschata Duch.*) and potato (*Solanum Tuberosum L.*) using finite difference method. Journal of Food Process Engineering 40(3):1-11.
- Villanueva MJ, Tenorio MD, Sagardoy M, Redondo A, Saco MD. 2005. Physical, chemical, histological and microbiological changes in fresh green asparagus (*Asparagus officinalis*, L.) stored in modified atmosphere packaging. Food Chemistry 91:609-619.
- Wachtel-Galor S, Wong KW, Benzie IFF. 2008. The effect of cooking on *Brassica* vegetables. Food Chemistry 110(3):706-710.
- Wang Z, Luh BS. 1983. Characterization of soluble and bound peroxidases in green asparagus. Journal of Food and Science 48:1412-1421.
- Wang S, Tang J, Cavalieri RP. 2001. Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments. Postharvest Biology Technology 22:257-270.

- Warren DS, Woodman JS. 1974. The texture of cooked potatoe: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 25:129-138.
- Weemaes CA, Ooms V, Van AM, Hendrickx ME. 1999. Kinetics of chlorophyll degradation and color loss in heated broccoli juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47:2404-2409.
- Won J, Hyun J, Ho I, Gorinstein S, Hyang J, Gyu Y. 2014. Bioactive compounds, antioxidant and binding activities and spear yield of *Asparagus officinalis* L.. *Plant Foods for Human Nutrition* 69:175-181.
- Xu G, Ye X, Chen J, Liu D. 2007. Effect of heat treatment on the fenolic compounds and antioxidant capacity of citrus peel extract. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55:330-335.
- Yang GK, Hyang J, Namiesnik J, Barasch D, Nemirovski A. 2017. Detection of bioactive in organic and conventionally grown asparagus spears. *Food Analytical Methods* 11(1):309-318.
- Yam KL, Papadakis SE. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering* 61(1):137-142.
- Zambrano EA, Yupanqui CV. 2016. Diseño y construcción de un equipo para la determinación de la conductividad térmica de alimentos sólidos mediante el método de Fitch modificado [Tesis de Licenciatura]. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro de Perú. 84 p.
- Zhang Z, Pang X, Xuwu D, Ji Z, Jiang. 2005. Role of peroxidase in abthocyanin degradation in litchi fruit pericarp. *Food Chemistry* 90(1):47-52.

Zheng H, Fang S, Lou H, Chen Y, Jiang L, Lu H. 2011. Neural network prediction of ascorbic acid degradation in green asparagus during thermal treatments. *Experts Systems with Applications* 38:5591-5602.

Zheng H, Lu H. 2011. Effect of microwave pretreatment on the kinetics of ascorbic acid degradation and peroxidase inactivation in different parts of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) during water blanching. *Food Chemistry* 128(4):1087-1093.

ABREVIATURAS

<i>A</i>	Área (m ²)
<i>a</i>	Coordenada cromática rojo/verde
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
<i>AT</i>	Acidez titulable
<i>b</i>	Coordenada cromática azul/amarillo
<i>Bi</i>	Número de Biot (adimensional)
<i>C.V.</i>	Coeficiente de variación
col	Colaboradores
<i>C_p</i>	Capacidad calorífica específica (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
DCPI	2,6-Diclorofenol indofenol
<i>h</i>	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W m ⁻² K ⁻¹)
<i>I</i>	Intensidad de corriente (A)
<i>k</i>	Conductividad térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)
<i>L</i>	Longitud (m)
<i>L*</i>	Luminosidad
LDL	Lipoproteínas de baja densidad (Low Density Lipoproteins)
<i>LOF</i>	Falta de ajuste (Lack Of Fit)
<i>LSD</i>	Diferencia mínima significativa (Least Significant Difference)
<i>m</i>	Masa (kg)
<i>m_{cc}</i>	Masa constante de la cápsula (g)
MEF	Método de elemento finito
<i>MEqA</i>	Miliequivalente del ácido cítrico

Mm	Masa de la muestra
m_{mf}	Masa de la muestra fresca (g)
m_{ms}	Masa de la cápsula con la muestra seca (g)
N	Normalidad
p	Significancia mínima
Q	Densidad de flujo de calor ($W\ m^{-2}$)
Q_L	Calor suministrado por unidad de longitud ($W\ m^{-1}$)
R	Resistencia (Ω)
R^2	Coeficiente de determinación
SIAP	Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera
T	Temperatura ($^{\circ}C$)
t	Tiempo (min)
t	Toneladas
T_{∞}	Temperatura del medio de calentamiento ($^{\circ}C$)
T_s	Temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)
USDA	United States Departement of Agriculture
V	Volumen (mL)
VG	Volumen de NaOH gastado (mL)
α	Difusividad térmica ($m^2\ s^{-1}$)
ΔE	Diferencia total de color
ε	Coeficiente de extinción molar ($mM^{-1}\ cm^{-1}$)
ρ	Densidad ($kg\ m^{-3}$)

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados experimentales de las corridas establecidas por el Diseño Central Compuesto Rotable de las variables de respuesta utilizadas para la optimización.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	% <i>RF</i>	ΔE	% <i>RCF</i>	% <i>RAA</i>	% <i>RAE</i>
55.9	2.6	87.9	9.8	46.5	64.2	40.3
84.1	2.6	79.4	10.8	44.5	32.5	7.9
55.9	5.4	69.6	9.7	40.6	57.2	36.6
84.1	5.4	64.6	12.1	40.3	25.2	3.3
50.0	4.0	82.4	9.5	46.3	62.4	45.8
90.0	4.0	64.7	12.0	43.6	20.0	0.7
70.0	2.0	86.9	10.0	45.6	44.6	29.3
70.0	6.0	62.7	11.5	39.2	31.7	17.8
70.0	4.0	80.4	10.7	46.6	38.4	23.8
70.0	4.0	80.6	10.4	44.9	36.6	22.9
70.0	4.0	80.4	10.7	44.0	35.0	25.6
70.0	4.0	76.1	10.9	43.1	43.6	22.0
70.0	4.0	82.4	10.6	44.7	38.4	20.1