



Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Ciencias Químico Biológicas

Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) empleando microondas

TESIS

Que presenta

JESÚS DAVID PELLEGRINI ZURITA

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIA

Y

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Directores de Tesis

MC. JORGE AURELIO ZAZUETA NIEBLA

DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES

Culiacán, Sinaloa, México

Febrero de 2017

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 MC. Jorge Aurelio Zazueta Niebla y el Dr. José de Jesús Caro Corrales y la asesoría del Dr. Roberto Gutiérrez Dorado. Jesús David Pellegrini Zurita 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, Sinaloa el día 06 del mes Julio del año 2020, el (la) que suscribe Jesús David Pellegrini Zurita alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de alimentos con número de cuenta 1466405-4, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M.C. Jorge Aurelio Zazueta Niebla y Dr. José de Jesús Caro Corrales y cede los derechos del trabajo titulado "Inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) empleando microondas.", 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.

Jesús David Pellegrini Zurita

AGRADECIMIENTOS

No cabe duda de que, con las palabras adecuadas, se puede mostrar la gratitud hacia todos aquellos que, en mayor o menor proporción, apoyaron con palabras y acciones esta etapa de mi vida.

A mis padres, David y Aide, quienes construyeron a base de valores y principios mi carácter, preparándome para afrontar cada una de mis decisiones. Se agradece la confianza depositada y el apoyo aun viviendo lejos de ellos, sin el cual no hubiese sido posible todo.

A mis hermanos Dania Vianey y David, porque siempre es reconfortante regresar y hacerme sentir como si nunca hubiese salido de casa. Por los momentos de ocio, de caminatas, carreras, rodadas, peleas y senderismo juntos.

A la universidad Autónoma de Sinaloa, a la Facultad de Ciencias Químico Biológicas y en especial, al programa de posgrado: Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, por permitir avanzar en mi formación académica hacia un nivel más profundo, y darme la oportunidad de crecer tanto profesional como personalmente.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado durante dos años.

A mis directores de tesis:

Al Dr. José de Jesús Caro Corrales, quien con su experiencia, palabras motivadoras y pláticas me impulsó a seguir adelante con el trabajo. Le agradezco enormemente por recibirme y darme la oportunidad de desarrollarme bajo su tutela. Por ayudarme a comprender adecuadamente que siempre hay manera de lograr las cosas. Por su compañía de tutor, y sus excelentes consejos que me sirvieron durante mi estadía y me servirán también en el futuro.

Al MC. Jorge Aurelio Zazueta Niebla, quien con apoyo y conocimiento, me ayudó a desarrollarme en muchos aspectos académicos y personales. Sus comentarios, puntuales y diligentes, tienen la característica de mostrar matices que se pueden mejorar, y que llevo conmigo a las situaciones venideras.

A mis amigos y compañeros de laboratorio: Cesar, Rosalina y Yessica. Por hacerme parte de su grupo, lo cual hizo de mi estancia ahí muy grata. Me llevo conmigo todas nuestras pláticas, convivencias y cada historia compartida. Sin duda, no hubiera podido lograr mi cometido sin ustedes, sobre todo porque nunca llegó el día en el cuál no sonriera ante la adversidad, la ironía, y al hecho de habernos conocido.

A Bianca, Lupita, Luis Ángel y todos mis amigos y compañeros de generación, por compartir un poco de sus historias conmigo. Y claro, por el apoyo incondicional durante las diferentes etapas del posgrado.

A todos los profesores de la Maestría en Ciencia y Tecnología en Alimentos, por sus lecciones académicas y de vida, en especial al Dr. Roberto Gutiérrez Dorado, por darse el tiempo de atenderme y ayudarme, al ser parte de mi comité.

Un agradecimiento especial al MC. Ignacio Chávez Sánchez, de Agrícola el Chaparral, por su desinteresado apoyo, proporcionando la materia prima utilizada en la etapa experimental de este trabajo.

A mi amigo y primo Hugo Alexander, quien me recibió en su casa al llegar a la ciudad y con quien siempre estaré en deuda.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	ix
I RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN DE LA LITERATURA	7
A. ESCALDADO	7
1. Generalidades	7
2. Efecto del escaldado sobre atributos de calidad	8
B. TOMATE	11
1. Generalidades	11
2. Color	11
3. Valor nutricional	14
4. Importancia	17
a. Producción mundial	17
b. Producción nacional	17
5. Procesamiento industrial de tomate	20
a. Enzimas de importancia en el procesamiento de tomate	20
b. Productos derivados del tomate	24
C. MICROONDAS	27
1. Generalidades	27

	2. Partes de un microondas	29
	3. Funcionamiento de un microondas	31
	4. Aplicaciones del microondas	32
	5. Escaldado con microondas	34
IV	JUSTIFICACIÓN	35
V	OBJETIVOS	37
	A Objetivo general	37
	B Objetivos específicos	37
VI	MATERIALES Y MÉTODOS	38
	A. MATERIALES	38
	1 Materia prima	38
	a Equipo microondas	38
	B. MÉTODOS	39
	1. Escaldado tradicional	39
	2. Escaldado con microondas	40
	3. Escaldado con microondas, sin inmersión	40
	4. Parámetros fisicoquímicos	41
	a Diferencia total de color (ΔE)	41
	b Índice de consistencia (K)	42
	5. Parámetros nutrimentales	43
	a. Retención de ácido ascórbico	43
	6. Parámetros enzimáticos	44
	a Actividad remanente de poligalacturonasa	44

1) Extracción de la enzima	45
2) Ensayo enzimático	45
7. Métodos estadísticos	46
a Diseño experimental	46
b Optimización	48
c Análisis de datos	48
d Validación del modelo de predicción	49
e Contraste de los métodos de escaldado	49
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
A MODELOS EXPERIMENTALES DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO	50
1. Escaldado tradicional	50
a Parámetros fisicoquímicos	50
1) Diferencia total de color (ΔE)	50
2) Índice de consistencia (K)	52
b Parámetros nutrimentales	54
1) Retención de ácido ascórbico	54
c Parámetros enzimáticos	56
1) Actividad remanente de poligalacturonasa	56
2 Escaldado con microondas	58
a Parámetros fisicoquímicos	58
1) Diferencia total de color (ΔE)	58

2) Índice de consistencia (<i>K</i>)	60
b Parámetros nutrimentales	63
1) Retención de ácido ascórbico	63
c Parámetros enzimáticos	64
1) Actividad remanente de poligalacturonasa	64
3 Escaldado con microondas sin inmersión	66
a Parámetros fisicoquímicos	66
1) Diferencia total de color (ΔE)	66
2) Índice de consistencia (<i>K</i>)	68
b Parámetros nutrimentales	70
1) Retención de ácido ascórbico	70
c Parámetros enzimáticos	72
1) Actividad remanente de poligalacturonasa	72
B MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO	74
1 Optimización de los procesos de escaldado	74
a Escaldado tradicional	74
b Escaldado con microondas	76
c Escaldado con microondas sin inmersión	78
2 Validación de los modelos de predicción	80
a Escaldado tradicional	80
b Escaldado con microondas	82
c Escaldado con microondas sin inmersión	84

C	CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE OBTENIDO CON LAS MEJORES CONDICIONES ESCALDADO TRADICIONAL, ESCALDADO CON MICROONDAS Y ESCALDADO CON MICROONDAS SIN INMERSIÓN.	86
1	Parámetros fisicoquímicos.	86
	a Diferencia total de color (ΔE)	86
	b Índice de consistencia (K)	89
2	Parámetros nutrimentales	91
	a Retención de ácido ascórbico	91
3	Parámetros enzimáticos	94
	a Actividad remanente de PG1	94
	b Actividad remanente de PG2	96
VIII	CONCLUSIONES	98
IX	BIBIOGRAFÍA	100
	ANEXOS	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	pág.
1	Estructura del licopeno.	13
2	Estados de maduración de tomate establecidos por la USDA.	15
3	Reacción de la poligalacturonasa.	22
4	Proceso industrial de jugo, pasta y salsa de tomate.	25
5	Espectro electromagnético.	28
6	Partes que componen un microondas.	30
7	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el ΔE de jugo de tomate obtenido por escaldado tradicional.	51
8	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre K de jugo de tomate obtenido por escaldado tradicional.	53
9	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la retención de ácido ascórbico de jugo de tomate obtenido por escaldado tradicional.	55
10	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la actividad remanente de PG1 de jugo de tomate obtenido por escaldado tradicional.	57
11	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el ΔE de jugo de tomate obtenido mediante escaldado con microondas.	59

Figura	Descripción	pág.
12	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre K de jugo de tomate obtenido mediante escaldado con microondas.	61
13	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de retención de ácido ascórbico del jugo de tomate mediante escaldado con microondas.	63
14	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la actividad remanente de PG1 de jugo de tomate obtenido mediante escaldado con microondas.	65
15	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el ΔE de jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.	67
16	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el K de jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.	69
17	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la retención de ácido ascórbico en jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.	71
18	Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la actividad remanente de PG1 en jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.	73
19	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado tradicional de tomate.	75

Figura	Descripción	pág.
20	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de tomate con microondas.	77
21	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de tomate con microondas sin inmersión.	79

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	pág.
1	Composición proximal de algunas variedades de tomate.	16
2	Principales países productores de tomate en 2012.	18
3	Principales estados mexicanos productores de tomate durante el año 2013	19
4	Valores de D y z para poligalacturonasa en tomate.	23
5	Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización del proceso de escaldado.	47
6	Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta evaluadas en jugo de tomate escaldado con tratamiento tradicional.	81
7	Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta evaluadas en jugo de tomates escaldados con microondas.	83
8	Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta evaluadas en jugo de tomates escaldados con microondas sin inmersión.	85
9	Valores experimentales de diferencia total de color de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión.	88
10	Valores experimentales de índice de consistencia de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión.	90
11	Valores experimentales de retención de ácido ascórbico de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión.	93

Cuadro	Descripción	pág.
12	Valores experimentales de actividad enzimática de poligalacturonasa (PG1) de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de calentamiento con microondas, tratamiento tradicional y tratamiento combinado.	95
13	Valores experimentales de actividad enzimática de poligalacturonasa (PG2) de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de calentamiento con microondas, tratamiento tradicional y tratamiento combinado.	97

I RESUMEN

El tomate es un fruto de suma importancia en el mundo, sus derivados industriales gozan de gran aceptación y la calidad de los mismos depende de los procesos empleados en su fabricación. En la industria del tomate se utiliza el escaldado tradicional para la inactivación de enzimas. Sin embargo, los procesos térmicos influyen severamente sobre dichos parámetros y una exposición prolongada causa pérdida de color, firmeza y valor nutricional. El escaldado con microondas es una alternativa al escaldado tradicional, con la ventaja de generar calor dentro de la muestra potenciando la inactivación térmica de la enzima objetivo. Sin embargo, existe escasa información acerca de esta tecnología aplicada en tomate. Por esa razón el objetivo de este trabajo fue contrastar el proceso de escaldado de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv grape utilizando el escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión en agua, con base en parámetros fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos para obtener jugo de tomate escaldado. Las condiciones de proceso de escaldado tradicional (ET), escaldado con microondas (EM) y escaldado con microondas sin inmersión (EMSI), fueron optimizadas. Las variables de proceso seleccionadas fueron: temperatura (60 °C; a 90 °C) y tiempo (1 min; a 6 min). Las condiciones para los tres métodos se obtuvieron de un diseño experimental central compuesto rotatable con cinco niveles de variación. Para la optimización se utilizó la metodología de superficie de respuesta, empleando parámetros fisicoquímicos [diferencia total de color (ΔE) e índice de consistencia (K)], nutrimentales (retención de ácido ascórbico) y enzimáticos (actividad remanente de poligalacturonasa) en función de las variables de proceso. ΔE se determinó por medio de los parámetros L, a y b de jugo escaldado y jugo fresco y se compararon. K se calculó con el modelo de la ley de la potencia y valores experimentales. La retención de ácido ascórbico se determinó con titulación de 2, 6

diclorofenolindofenol. La actividad remanente de PG1 se determinó por medio del ensayo del ácido bicinconínico. Se consideró deseable una menor ΔE y actividad remanente de poligalacturonasa, asimismo un valor mayor de K y retención de ácido ascórbico. Las mejores condiciones fueron: ET, 1 min y 60°C (0.701); EC, 1.1 min y 90°C ($d = 0.638$); y EMSI, 1 min y 90°C ($d = 0.779$). Se generaron modelos de predicción y se validaron para cada método de escaldado. Se obtuvieron muestras de tomates escaldados con las condiciones óptimas de proceso para cada método y se contrastaron con base en parámetros fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos. Los valores de ΔE , K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$), retención de ácido ascórbico (%) y actividad remanente de PG1 (%) fueron: 1.97 ± 0.66 , 0.66 ± 0.07 , 87.13 ± 0.99 y 96.21 ± 2.14 , para ET, 10.61 ± 3.69 , 0.37 ± 0.07 , 82.04 ± 1.20 y 83.48 ± 1.86 para EM y 18.32 ± 2.36 , 2.45 ± 0.54 , 88.93 ± 1.93 , y 80.89 ± 1.09 para EMSI, respectivamente. El método de ET preservó mejor el color. Sin embargo, ambos métodos con microondas (EM y EMSI), bajo condiciones optimizadas, inactivaron en mayor proporción la actividad enzimática de poligalacturonasa. Para el caso de la consistencia, EMSI fue superior que los otros dos métodos. Y dos métodos (ET y EMSI) generaron un producto con valores similares en la retención de ácido ascórbico, mientras que EM presentó menor retención, estadísticamente.

ABSTRACT

Tomatoes are an important fruit in the world, and their products have great acceptance. The quality of this products depends on the processing conditions. Blanching is a common step in the tomato industry, used to inactivate enzymes. However, the thermal process has an influence on quality parameters, a prolonged exposure causes losses on color, firmness and nutritional value. Microwave blanching is an alternative to water blanching, with the advantage of heat generation within the sample, which leads to more enzyme inactivation. There is a lack of information on literature about this technology applied on tomatoes. The aim of this work was to contrast traditional blanching, microwave blanching and microwave blanching without immersion in water, on physicochemical, nutrimental and enzymatic parameters of tomato juice. The process conditions of the traditional blanching (TB), microwave blanching (MWB), and the microwave blanching without water immersion (MWBWI) were optimized. The process variables selected were: temperature (60°C to 90°C) and time (1 min; to 6 min). For the three methods, conditions were obtain from a central composite experimental design with five variation levels. For optimization, response surface methodology was employed, using physicochemical [total color difference (ΔE) and consistency index (K)], nutrimental (ascorbic acid retention), and enzymatic (residual polygalacturonase activity) parameters as response variables. ΔE was determined by measuring L, a, and b parameters of fresh and blanched tomato juice. K was calculated from the power law model and experimental data. Acid ascorbic retention was determined by titration of 2, 6 dichlorophenolindophenol. Polygalacturonase activity was determined by the bicinchoninic acid assay. Criteria for the optimization of these variables were the lowest ΔE and residual enzymatic activity of PG1, and the highest values of K and ascorbic acid retention. The best conditions for TB were: 1 min, 60°C ($d=0.701$), for MWB were 1.1 min,

90°C ($d=0.638$) and for MWBWI were: 1 min, 90°C ($d=0.779$). Prediction models were generated and validated. Samples of blanched tomatoes under optimal conditions were contrasted using physicochemical, nutrimental and enzymatic parameters. The values of ΔE , K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$), ascorbic acid retention (%), and residual enzymatic activity of PG1 (%) were: 1.97 ± 0.66 , 0.66 ± 0.07 , 87.13 ± 0.99 y 96.21 ± 2.14 , for TB, 10.61 ± 3.69 , 0.37 ± 0.07 , 82.04 ± 1.20 y 83.48 ± 1.86 for MWB, and 18.32 ± 2.36 , 2.45 ± 0.54 , 88.93 ± 1.93 , y 80.89 ± 1.09 for MWBWI, respectively. TB was the best method to preserve color. However, MWB and MWBWI inactivate more the enzymatic activity of polygalacturonase. The consistency index, on the other hand, was superior on the MWBWI. The ascorbic acid retention in two methods (TB and MWBWI) was similar, while the MWB showed less retention.

II INTRODUCCIÓN

En la industria de los alimentos el control de reacciones enzimáticas juega un papel importante en la calidad de los productos terminados. Los procesos metabólicos propios de frutas y hortalizas, influenciados por la temperatura ambiental, madurez y condiciones de procesamiento, modifican los atributos de textura, color, sabor y olor a través de enzimas que degradan o generan compuestos (Sánchez-Hernández y col 1999; Mikkelsen 2005).

El escaldado es una operación unitaria que tiene como objetivo principal la inactivación enzimática. Es una etapa dentro de procesos tales como la congelación, el secado, freído y el enlatado. Comúnmente se sumergen hortalizas en agua caliente (el más común), vapor, o en soluciones ácidas o salinas a punto de ebullición (Shaheen y col 2012).

El escaldado tiene ventajas adicionales como una disminución de la carga microbiana y remoción del aire. Además, puede liberar compuestos tales como carotenoides, aumentando su biodisponibilidad, y por tanto su actividad antioxidante. Sin embargo, también presenta inconvenientes; ocasiona ablandamiento de los tejidos vegetales, permite una lixiviación y degradación de compuestos como azúcares, minerales y vitaminas (Aguilar y col 1999). Por estas razones, se buscan maneras de disminuir los efectos negativos del escaldado ordinario.

El escaldado con microondas es una alternativa sobre el método tradicional de escaldado. Se basa en el uso de ondas electromagnéticas y las propiedades dieléctricas del alimento para inducir calentamiento. El componente principal de un alimento fresco es el agua, una molécula polar (Aguilar y col 1999), es decir, que tiene una distribución no homogénea en su densidad de carga, en consecuencia, se orienta en el campo electromagnético. En un horno de microondas el campo cambia con mucha velocidad, y la orientación de la molécula polar también. El calor se genera por la fricción que se produce por estos cambios (Vollmer 2004; Shaheen y col 2012).

En el escaldado con microondas el calor es distribuido uniformemente en el material, donde la tasa de transferencia de calor es mayor en comparación con el escaldado tradicional, donde el calor se transfiera desde la superficie de contacto hasta el interior del alimento (punto frío). En este sentido y aunado a la capacidad de penetración de las microondas, este escaldado posee la ventaja de generar calor internamente, lo que incrementa la retención de compuestos termolábiles (Ranjan y col 2016).

Comúnmente se ha reportado la aplicación de esta tecnología en alimentos sumergidos en agua, o en soluciones ácidas o salinas, que sirven de amortiguador para el calor generado. Sin embargo, esta modificación puede ocasionar pérdida de compuestos por lixiviación (Chandrasekaran y col 2013). Los reportes donde utilizan este método con hortalizas sin inmersión en agua son limitados (Schirack y col 2006; Dorantes-Alvarez y col 2011)

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tiene un lugar de importancia entre las hortalizas en el mundo, su consumo y la diversidad de productos derivados de él, lo ubican en un lugar de impacto en la economía. En la industria del tomate, el proceso de escaldado es esencial. Sin embargo, si la temperatura para inactivar enzimas es alta, puede ocasionar modificaciones en las características sensoriales de los productos (Anthon y col 2002).

En el caso exclusivo del tomate, la inactivación suele realizarse después de obtener jugo (SSP 2015; Stratakos y col 2016). No se encontraron reportes indicando la inactivación enzimática previa al proceso de molienda.

III REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Escaldado.

1. Generalidades

El escaldado es una operación unitaria en la cual, frutas u hortalizas son calentadas con el propósito de inactivar enzimas. Esto ocasiona diversos efectos como la modificación de la textura, los parámetros sensoriales y nutrimentales. El escaldado se utiliza como una etapa previa dentro de procesos de conservación de alimentos, entre los cuales encontramos a la congelación, enlatado o secado. Comúnmente, los frutos u hortalizas son sumergidos en agua caliente, soluciones salinas o ácidas, sin embargo, también se utiliza vapor como medio de calentamiento (De Corcuera y col 2004). La temperatura de operación se establece de acuerdo a la estabilidad térmica de la enzima que se desea inactivar, es decir, diferentes temperaturas tienen efectos específicos sobre la enzima y sobre las cualidades de los frutos frescos. El intervalo de temperatura del escaldado normalmente es de 70-100 °C (Aguilar y col 1999; De Corcuera y col 2004)

El escaldado ordinario (tradicional) consiste en la inmersión de un vegetal fresco en agua a temperatura de ebullición, durante un tiempo corto, con el fin de lograr la inactivación enzimática. Este procedimiento incrementa la estabilidad de los vegetales durante largos periodos de almacenamiento cuando se congelan, o se someten a otros procesos de conservación. El calor aplicado, sobre todo en temperaturas elevadas, ocasiona un ablandamiento de los tejidos, además, ocurre una lixiviación de nutrimentos por solubilización al medio de calentamiento, así como una pérdida de compuestos termosensibles, remoción de aire y alteraciones en el color del producto terminado. Es por eso que se especifica el atributo a modificar teniendo en cuenta los efectos adversos que pudiera tener sobre otras características (Aguilar y col 1999).

Por otro lado, el escaldado con vapor tiene la ventaja de ser un proceso de inactivación enzimática más eficiente, energéticamente hablando. Se aplica vapor a 100 °C directo en una cámara de acero inoxidable de grado alimenticio. El tiempo de transferencia por lo general es muy corto, debido principalmente a que el coeficiente de transferencia de calor del vapor es mayor al del agua caliente, esto conlleva una reducción en el desperdicio de agua y la pérdida de componentes por solubilización es menor. Sin embargo, al establecer las condiciones de operación se deben especificar adecuadamente, en esencia porque a diferencia del vapor, el coeficiente de transferencia de calor de las hortalizas es menor.

La transferencia de calor por conducción ocurre desde la superficie hasta el centro de la hortaliza, o hacia el punto frío. Se considera entonces las características de tamaño y forma del alimento. Si se cuenta con un tamaño mayor puede ocurrir un sobreescaldado en la superficie, asimismo un subescaldado en los puntos fríos, principalmente por la diferencia de temperatura que pueden alcanzar estos dos puntos (De Corcuera y col 2004).

2. Efecto del escaldado sobre los atributos de calidad.

Las pectinas, compuestos presentes en la lámina media de la pared celular tienen un papel fundamental en la textura de frutos frescos y sus productos procesados. Son heteropolímeros con predominio indirecto del ácido galacturónico con enlaces α (1–4). Durante el escaldado, si se utiliza baja temperatura (<60 °C), se promueve la actividad de la pectilesterasa (PE), enzima que hidroliza los enlaces éster del ácido galacturónico, produciendo metanol y grupos carboxilos libres, estos son capaces de reaccionar con iones divalentes, como el calcio y el magnesio, y se crean estructuras más rígidas que aumentan la firmeza de los vegetales. Este método de escaldado de baja temperatura y tiempos largos comúnmente se complementa con la adición de sales de calcio. Por otro lado, el calor húmedo (con temperatura alta) aplicado ejerce

efecto sobre la pared celular y rompe la estructura organizada y cambia la permeabilidad, lo que aumenta la flexibilidad de los tejidos (ablandamiento) (Aguilar y col 1999).

El color es una característica que juega un papel fundamental en el consumo y procesamiento de alimentos. Sirve de pauta inicial y atractiva a los consumidores. Durante el proceso de maduración de frutas y hortalizas, ocurren cambios en la coloración. También cuando están sujetos a daño físico o una enfermedad, se puede notar la diferencia sobre la superficie de los frutos. Algunas enzimas, como la polifenol oxidasa están involucradas en la oxidación de diversos compuestos orgánicos, que lleva a una directa deterioración en la calidad visual del mismo (Thongsook y Barrett 2005).

Por otro lado, la operación unitaria del escaldado puede afectar de manera indirecta la coloración. Los carotenoides, por ejemplo, son el grupo principal de compuestos responsable de las tonalidades rojas, anaranjadas y amarillas en frutas y hortalizas. Cuando se procesan, a través de una exposición a temperaturas elevadas, ocurre una isomerización, oxidación y fragmentación de los carotenoides, promoviendo la pérdida del color original (Gonçalves y col 2007; Khoo y col 2011), efecto que fue corroborado por otra investigación (Huang y col 2007), donde el escaldado ocasionó pérdida de clorofila, un pigmento natural encontrado en hortalizas verdes. Otro ejemplo es en el escaldado de papas.

Durante el proceso, el contenido de azúcares reductores puede verse reducido vía lixiviación de sólidos solubles, lo que afecta el desarrollo de color en procesos posteriores de calentamiento donde se involucra el oscurecimiento no enzimático (Reacción de Maillard) (Elfesh y col 2011).

Con respecto al sabor, la razón principal de que el escaldado tenga influencia sobre esta cualidad en vegetales frescos se debe a la inactivación de lipoxigenasa (LOX), que es un grupo de enzimas que llevan a cabo la oxigenación o peroxidación de diversos compuestos

insaturados, como ácidos grasos libres, triacilglicéridos, pigmentos y algunas vitaminas (Mikkelsen 2005; Badui Dergal 2006). En los vegetales frescos, la ruta metabólica de este grupo enzimático lleva a la degradación y generación de compuestos volátiles característicos de cada vegetal. Algunos ejemplos son el hexanal y cis-3-hexenal, compuestos asociados con el sabor particular de tomates verdes (Mirondo y Barringer 2015).

El escaldado tiene un impacto en el valor nutricional de frutas y hortalizas. El ácido ascórbico (vitamina C) es el constituyente nutricional más evaluado debido a la alta susceptibilidad al calor y solubilidad que presenta. Se utiliza como un indicador de retención de nutrimentos en procesos térmicos aplicados a los alimentos. Otros nutrimentos, como las vitaminas B1 y B2, los carotenoides y la fibra, se han empleado como indicadores también, esto debido a una disminución de su contenido después del escaldado, comparado con el contenido inicial del mismo (De Corcuera y col 2004; Oboh 2005).

Se ha reportado que la actividad antioxidante se reduce drásticamente después del escaldado. Las antocianinas son el principal grupo de moléculas asociados con dicha actividad en fresas (Klopotek y col 2005), en amaranto se atribuye a su contenido en compuestos fenólicos (Amin y col 2006), asimismo en hortalizas de hojas verdes tales como repollo (Amin y Lee 2005). Además, se ha relacionado el contenido de carotenoides con esta cualidad. En todos los casos anteriores, la temperatura afecta tanto el contenido como la estructura con lo cual se pierde parcialmente la capacidad antioxidante de los productos terminados.

B. Tomate.

1. Generalidades.

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una hortaliza de suma importancia en el mundo. Su consumo es amplio, tanto en fresco, como en sus diferentes presentaciones procesadas. Es versátil en su acompañamiento a los alimentos y posee mucha aceptación debido a sus características sensoriales (Sánchez y col 2000; Leoni y Jongen 2002; Mirondo y Barringer 2015).

Su origen ha sido determinado en la región andina, que se extiende desde el sur de Colombia al norte de Chile. Desde allí, fue llevado a Centroamérica y México. Posteriormente se llevó a Europa y al resto del mundo (Monardes 2009).

México ha sido señalado como el probable centro de domesticación (Nuez 1995). A la llegada de los españoles a América, el tomate formaba parte de la cultura azteca. Además el nombre moderno tiene procedencia en la lengua náhuatl de México, donde se llamaba "*tomatl*" (Rodríguez y col 1997).

El tomate se cultiva en zonas templadas y cálidas. Se desarrolla en un amplio rango de latitudes, tipos de suelos, temperaturas, métodos de cultivo y es moderadamente tolerante a la salinidad (Salas y col 2001).

2. Color.

Los tomates son usualmente consumidos cuando sus características sensoriales están en su mayor exposición, lo cual ocurre cuando alcanzan el estado de madurez rojo, justo antes de que el tejido sufra de ablandamiento debido al metabolismo. El color del tomate es la característica visual más importante durante la maduración cuando se recolecta los frutos y pasan a la etapa de poscosecha, y también es el factor de predilección que los consumidores consideran a la hora de la compra (López Camelo y Gómez 2004).

En tomate la coloración roja se atribuye al contenido de licopeno, un carotenoide encontrado también en otras frutas y hortalizas, como sandía o chile. Durante la maduración del fruto de tomate, otro compuesto, la clorofila (color verde) se degrada permitiendo la síntesis de licopeno (Khoo y col 2011; El-Raey y col 2013)

El licopeno es un hidrocarburo poliinsaturado con una estructura de 40 átomos de carbono de cadena abierta, y consiste en 11 enlaces dobles conjugados y 2 no conjugados (Fig. 1). Naturalmente se presenta en la conformación espacial *trans*. El color rojo deriva principalmente de la alta cantidad de enlaces dobles conjugados, los cuales absorben más el espectro visible que otros carotenoides (Khoo y col 2011).

Basados en el color externo, la USDA (2016) estableció seis etapas de maduración basadas en la diferente tonalidad y saturación del color. Como se muestra en la **Figura 2**, la clasificación en números (1-6) corresponde a un porcentaje de coloración durante la maduración del fruto.

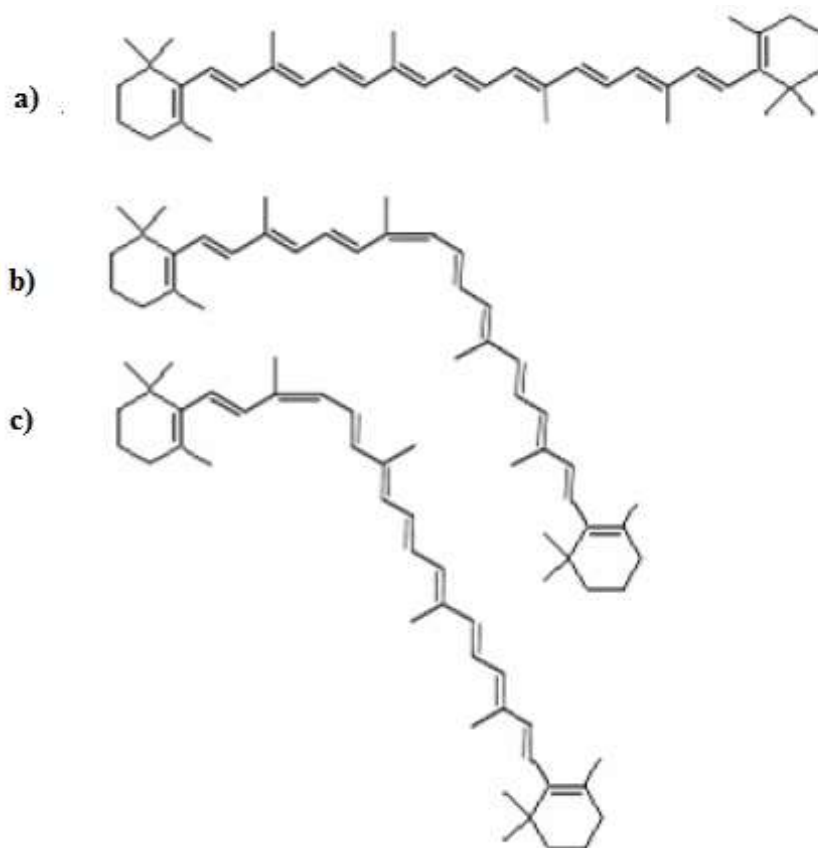


Figura 1. Estructura del licopeno. a) All-trans- β -caroteno. b) 13 -cis- β -caroteno. c) 9-cis- β -caroteno. Modificado de Khoo y col (2011)

3. Valor nutricional.

El tomate aporta a la dieta un alto valor nutricional debido a la riqueza y diversidad de nutrimentos. En el **Cuadro 1** se presenta la composición proximal de algunas variedades de tomate, en la cual, se destaca el contenido alto de humedad, bajo en grasa y proteínas, además de vitamina C y carotenoides (Odrizola-Serrano y col 2007; Sosa-Morales. 2012).

Estudios han relacionado el consumo del tomate con la reducción en el padecimiento de diversas enfermedades, este efecto se atribuye principalmente a su contenido en compuestos activos (Domene y col 2014). El licopeno y el ácido ascórbico (vitamina C) tienen una función antioxidante en el organismo, y reaccionan estabilizando las especies reactivas de oxígeno, compuestos conocidos por aumentar el riesgo de padecimiento de un gran número de enfermedades, en las cuáles se incluye el cáncer y enfermedades cardiovasculares (Martínez-Valverde y col 2002).

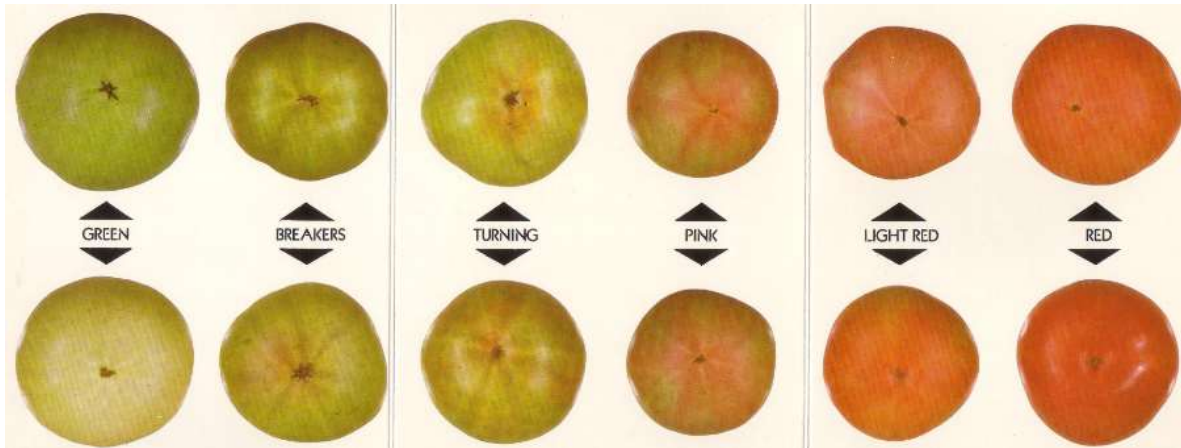


Figura 2. Estados de maduración de tomate establecidos por la USDA. De izquierda a derecha. Verde (100% color verde), rompiente (coloración roja o rosada $\leq 10\%$), cambiante (coloración roja o rosada entre 10 y 30%), rosado (coloración roja o rosada entre 30 y 60 %), rojo ligero (coloración roja entre 60 y 90%) y rojo (coloración roja $\geq 90\%$) (USDA 2016)

Cuadro 1. Composición proximal de algunas variedades de tomate.

Variedad	Agua (g)	Proteína total (g)	Grasa total (g)	Cenizas (g)	Licopeno (µg)	Vitamina C (mg)
Cherry	95.2±1.2	0.78±0.02	0.49±0.05	0.90±0.10	1680±163	82±20
Pera	96.0±1.0	0.56±0.03	0.26±0.04	1.00±0.11	1542±138	130±25
Uva	93.3±1.5	0.91±0.10	0.20±0.04	1.25±0.16	1568±161	174±21

Modificado (Sosa-Morales. 2012)

4. Importancia.

a. Producción mundial.

En el **Cuadro 2** se enumeran los países que ocupan los primeros 10 lugares de producción de tomate a nivel mundial durante el año 2012. China fue el principal productor con 50,000,000 toneladas. Durante el mismo periodo, México ocupó el décimo lugar con una producción total de 3, 433,567 toneladas (FAOSTAT 2016).

En 2014, acorde con FAOSTAT (2016) la producción de pasta, un producto de tomate de gran aceptación, fue de 3,384,131 toneladas, siendo China el principal productor con 24.9%, seguido de Italia (10.6%) y Estados Unidos (7.83%).

b. Producción nacional.

Sinaloa en 2013 fue el principal productor nacional de tomate (**Cuadro 3**), seguido por los estados de Baja California, Zacatecas, San Luís Potosí y Jalisco (SIAP 2016). El tomate tiene un fuerte peso en la economía, pues México ocupa el primer lugar en exportación de dicho fruto, con el 21.6 % de las exportaciones a nivel mundial (Workman 2016).

Cuadro 2. Principales países productores de tomate en 2012.

País	Producción (Ton)
China	50, 000, 000
India	17, 500, 000
Estados Unidos de América	13, 206, 950
Turquía	11. 350, 000
Egipto	8, 625, 219
Irán	6, 000, 000
Italia	5, 131, 977
Brasil	4, 873, 985
España	4, 007, 000
México	3, 433, 567

Fuente: (FAOSTAT 2016).

Cuadro 3. Principales estados mexicanos productores de tomate en 2013.

Estado	Producción (Ton)
Sinaloa	983, 288
Baja California	196, 452
Zacatecas	143, 905
San Luís Potosí	141, 108
Jalisco	134, 436
Baja California Sur	108, 421
Michoacán	98, 435
Oaxaca	96, 693
Sonora	91, 856
Guanajuato	82, 352

Fuente: (SIAP 2016)

5. Procesamiento industrial de tomate.

a Enzimas de importancia en el procesamiento de tomate.

Se ha reportado una gran variedad de enzimas presentes en tomate. Las de mayor importancia para la industria de los alimentos son pectil metil esterasa (PME), poligalacturonasa (PG), β -galactosidasa (β -Gal), α -arabinofuranosidasa (α -Af), polifenol oxidasa (PPO) y peroxidasa (PE). Sin embargo, para fines prácticos de inactivación se propone como enzima modelo aquella cuya resistencia térmica sea mayor siendo, en este caso, la PG (Anthon y col 2002; Thipyapong y col 2004; Houben y col 2013a).

La poligalacturonasa (EC 2.1.1.15) forma parte del grupo de enzimas pectinasas que actúan sobre los enlaces glucosídicos α (1–4) del ácido poligalacturónico en la pectina (**Figura 3**). La pectina se degrada y su asociación con la lignina en la pared celular se pierde, esto ocasiona una pérdida de la firmeza en frutos enteros maduros, además en productos procesados modifica la viscosidad, disminuyéndola. La enzima tiene un pH óptimo de 4.0 (Ortega y col 2004b; Badui Dergal 2006)

Diversas investigaciones han logrado dilucidar que la poligalacturonasa presenta dos formas isoenzimáticas. A través del estudio de la cinética de inactivación de cada fracción se demostró que una forma es estable a la temperatura (PG1), mientras que la otra es termolábil (PG2). También, los autores estiman que PG1 conforma del 60-85% del total de la enzima, datos que se corroboran en trabajos de otros investigadores (Lopez y col 1997; Anthon y col 2002; Fachin y col 2003).

Hay dos tipos de mecanismos de acción identificados en PG, la endógena y exógena. Ambas atacan a la misma molécula, sin embargo lo hacen desde puntos diferentes. La exo-poligalacturonasa hidroliza el extremo no reductor del ácido poligalacturónico, mientras que la endo-poligalacturonasa actúa en el interior de la molécula (Fennema 2000; Badui Dergal 2006). A nivel industrial, es de suma importancia poder hacer una correcta predicción de las condiciones para inactivar la enzima, para ello se utilizan dos parámetros cinéticos: el tiempo de reducción decimal (D), que es el tiempo requerido para disminuir el 90% la actividad enzimática a una temperatura dada, y z, que representa el incremento de la temperatura necesaria para disminuir el valor D un ciclo logarítmico (Castro y col 2004). En la literatura, la mayoría de los reportes se enfocan en el porcentaje de inactivación al final de los procesos térmicos, por lo que hay una escasez de estos valores para las variedades de frutas y hortalizas investigadas (Lopez y col 1997). En el **Cuadro 4** se presentan valores D y z para poligalacturonasa en tomate.

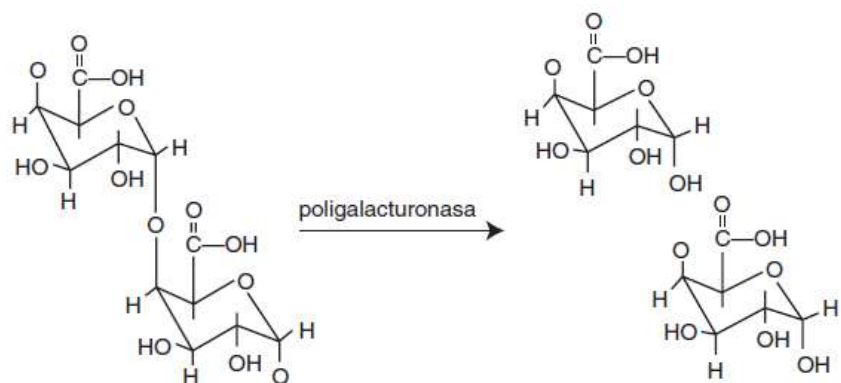


Figura 3. Reacción de la poligalacturonasa (Badui Dergal 2006).

Cuadro 4. Valores de D y z para poligalacturonasa en tomate.

Variedad de tomate	Enzima	Temperatura (°C)	Valor D (min)	Valor z (°C)	Referencia
Daniela F1	PG1	87	15.9	5.6	(Lopez y col 1997)
		95.4	0.46		
	PG2	64	2.14	9.4	
		73	0.24		
CXD 199	PG1	90	16.1	7.7	(Anthon y col 2002)
BOS 3155		90	15.8	7.1	
CXD 199	PG2	70	2.6	10.8	
BOS3155		70	4.0	10.4	

b. Productos derivados del tomate.

Una gran parte de la producción mundial de tomate se industrializa. Los productos terminados son variados, desde pasta, sopas, salsas y puré, hasta otras presentaciones con gran aceptación como jugos y cátsup. Los productos anteriores pueden almacenarse sin necesidad de refrigeración y son estables en sus respectivos contenedores, por lo que presentan una vida de anaquel prolongada. En la **Figura 5** se muestra el diagrama de flujo del proceso industrial de jugo, pasta y salsa de tomate, primeramente el tomate se acepta con base en criterios de calidad ya establecidos, eliminando piezas con daños físicos, verdes o sobremaduros o con alguna contaminación física o microbiológica. Posteriormente se lavan, se clasifican y se trituran para obtener el jugo, separando cáscara y semillas como merma. Se aplica la inactivación enzimática y se almacena temporalmente o se envía al siguiente proceso (SAGARPA 2010; SSP 2015).

En la industria del tomate, se manejan principalmente dos estándares en cuanto a tratamientos térmicos. El primero es a baja temperatura (*Cold break*). A un intervalo de temperatura alrededor de 60°C las enzimas pectinasas (PME y PG), mantienen su actividad y degradan la pectina, esto disminuye la viscosidad del producto terminado. Además, una temperatura baja impacta sensorialmente menos que la inactivación con altas temperaturas (*hot break*), por lo que el sabor, olor y color se conservan mejor. Este tratamiento térmico se utiliza en la producción de jugo de tomate (Hsu 2008).

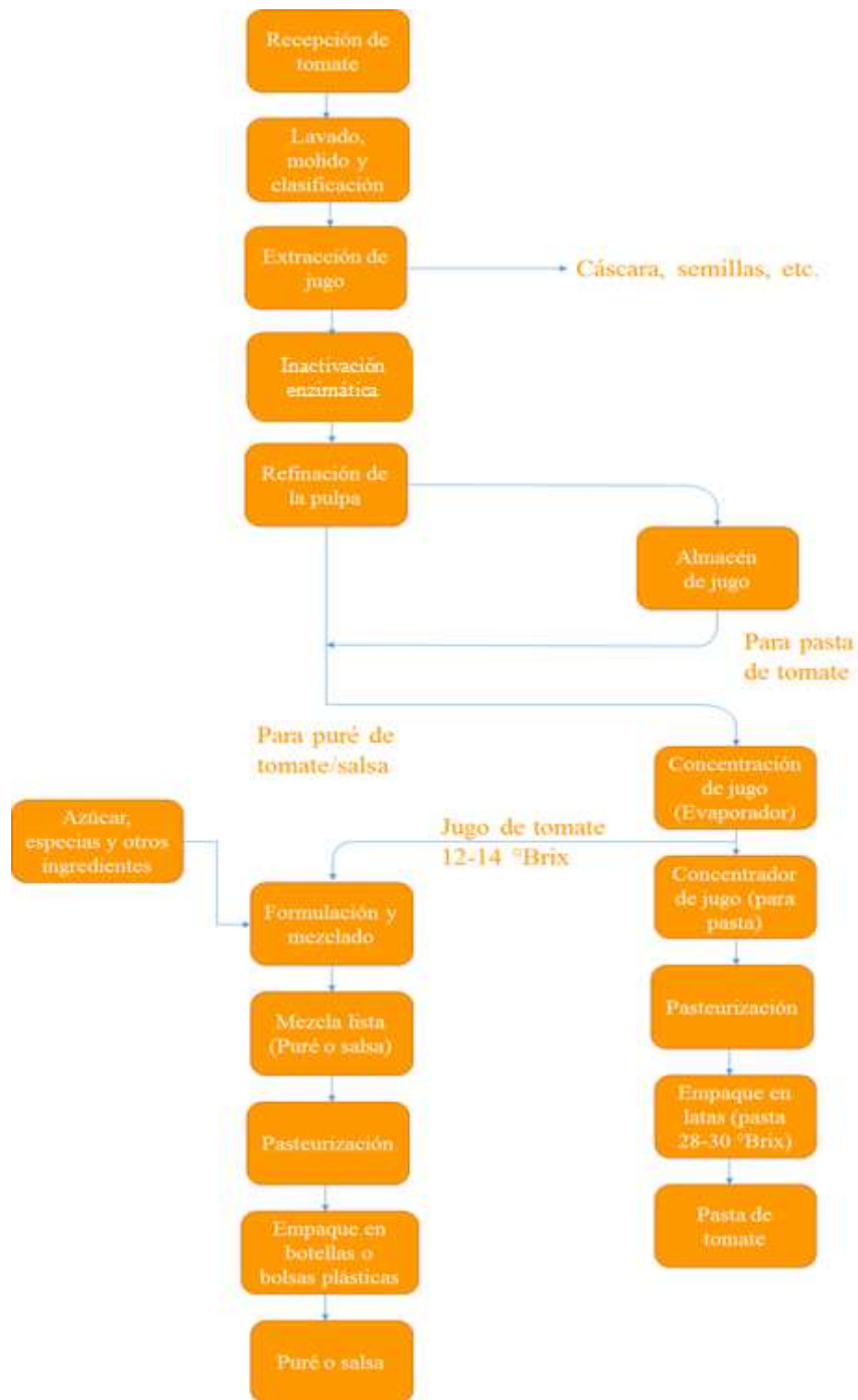


Figura 5. Proceso industrial de jugo, pasta y salsa de tomate. Modificado (SSP 2015).

El segundo es a temperatura elevada (*Hot break*). La inactivación enzimática en el intervalo de 85-95 °C tiene como finalidad que las pectinasas pierdan su actividad, contribuyendo a un aumento de la consistencia (Fachin y col 2004; Anthon y col 2008). Siguiendo el diagrama de flujo de la **Figura 5**, el jugo de tomate industrial (<8 °Brix) se concentra en evaporadores hasta llegar a 28-30 °Brix, lo cual hace que se clasifique como pasta. Aquí se toman una dirección considerando cuál vaya a ser el producto final. Por un lado, la pasta de tomate puede ser pasteurizada y empacada en latas. Por el otro, el jugo concentrado puede enviarse al siguiente proceso de fabricación de productos terminados. En esta línea, se hacen mezclas de ingredientes como azúcar y especias, dependiendo de la formulación para dar lugar a puré o salsas. La mezcla es homogenizada, pasteurizada y empacada ya sea en botellas de vidrio o bolsas plásticas (SSP 2015).

C. Microondas.

1. Generalidades.

Las ondas electromagnéticas son ondas de energía eléctrica y magnética que se mueven juntas a través del espacio. Estas ondas incluyen rayos gamma, rayos x, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja, microondas y la menos energética de todas, las ondas de radio. Microondas se refiere a las ondas en un intervalo de frecuencias de 300 a 300,000 MHz (millones de ciclos por segundo)(Vollmer 2004). En la **Figura 5** se muestra el espectro, clasificado de acuerdo al rango de frecuencias.

Las microondas pueden atravesar materiales como el vidrio, papel, plástico y cerámica, y pueden ser absorbidas por agua y también por alimentos con un contenido elevado de humedad, pero son reflejadas por metales (FEHD 2005). La profundidad de penetración depende del medio en el que se propaga y de la frecuencia. Para hornos de 2450 MHz (comerciales), el grado de penetración en carne es de 2 a 3 cm, y para otras comidas, de 5 a 7 cm. Si la frecuencia es mayor, la penetración será menor (Oliveira y Franca 2002).

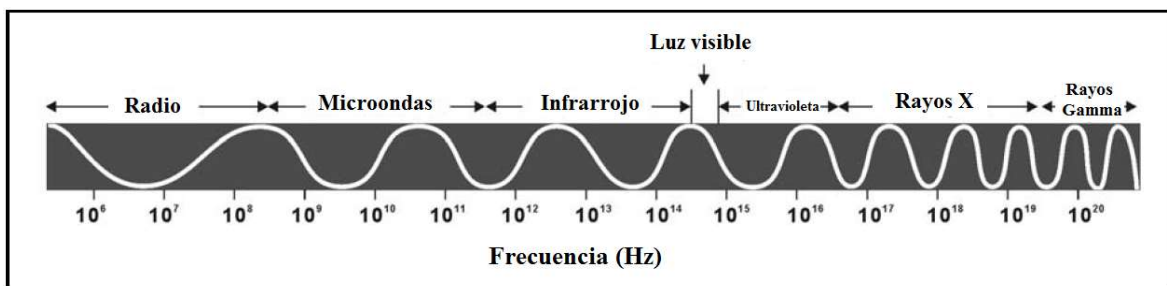


Figura 5. Espectro electromagnético (FEHD 2005)

2. Partes de un microondas.

Un horno de microondas (**Figura 6**) se constituye generalmente de las siguientes partes fundamentales:

- **Magnetron.** Es un tubo de vacío en el cual la energía eléctrica es convertida a un campo electromagnético oscilante. Las frecuencias más comunes son 900 MHz y 2450 MHz para microondas comerciales.
- **Una alimentación de energía (capacitor y transformador).** Controla la energía que se alimenta al magnetron así como el tiempo de operación.
- **Guía de ondas.** Es un tubo de metal rectangular que dirige las ondas generadas por el magnetron a la cavidad de microondas. Ayuda a prevenir una exposición directa del magnetron a cualquiera salpicadura de alimentos que pudieran interferir con su función.
- **Distribuidor.** Se utiliza para distribuir las ondas de la guía de ondas y permitir un calentamiento más uniforme en el alimento.
- **Placa giratoria.** Gira los alimentos a través de los puntos calientes y fríos dentro de la cavidad de microondas y permite que los alimentos sean expuestos, eventualmente, a las microondas.
- **Puerta o ranura de entrada de alimentos.** Permite colocar los alimentos y debe estar diseñada para prevenir que ocurran fugas entre la puerta y la cavidad de microondas (Vollmer 2004; FEHD 2005).

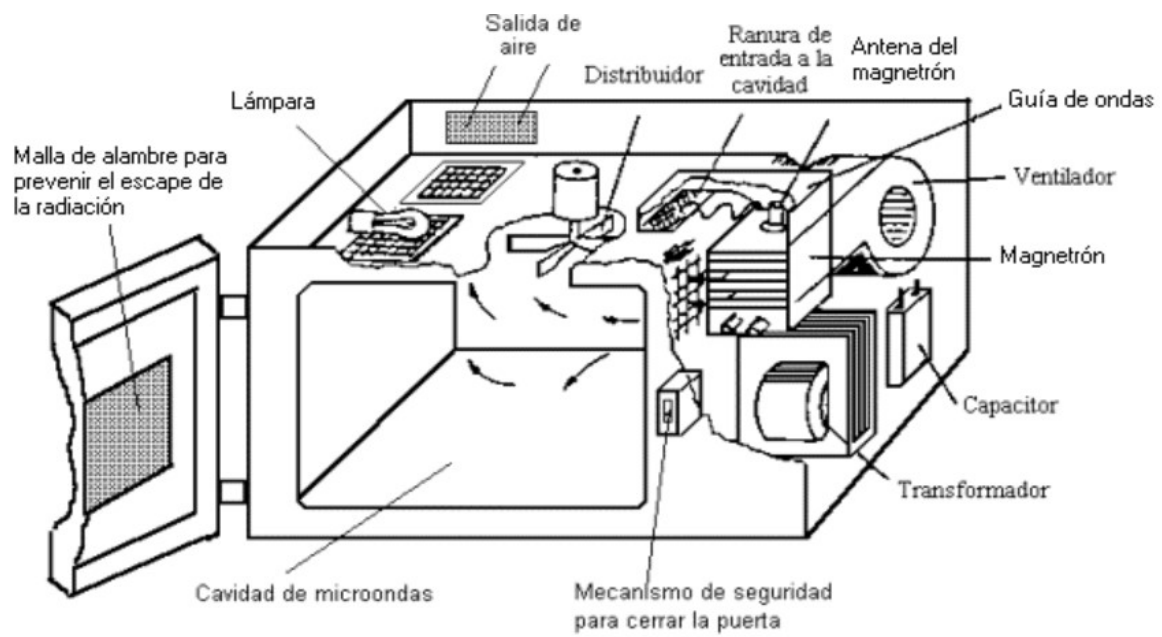


Figura 6. Partes que componen un microondas (CROCETEX 2015).

3. Funcionamiento de un microondas.

Las moléculas polares (distribución no homogénea de la densidad de carga) se orientan en el campo electromagnético que se genera en un microondas a través del magnetrón. El agua, molécula polar y principal componente de frutas, hortalizas y algunos alimentos, se alinea a los cambios en este campo, en el caso del microondas ocurre una oscilación con una velocidad vertiginosa, haciendo que dicha molécula cambie su orientación, la fricción de esa oscilación induce generación de calor. Dependiendo del tiempo de exposición, el alimento absorbe cierta cantidad de energía, que lo puede descongelar, calentar y hasta cocer (Oliveira y Franca 2002; Vollmer 2004).

La transferencia de calor en el procesamiento de alimentos, generalmente se da por conducción del medio de calentamiento hacia los puntos fríos (internos). Sin embargo, el microondas presenta la cualidad de generar calor dentro del alimento. Bajo esta premisa, la transferencia de calor por conducción comienza desde los distintos puntos de generación de calor hacia las partes con menos temperatura, incrementando la temperatura global del alimento de manera más rápida (Chandrasekaran y col 2013).

Muchos son los factores que afectan el calentamiento y la distribución del calor por microondas. Sin embargo, dos resaltan en importancia: propiedades dieléctricas y la profundidad de penetración. La habilidad de un material para convertir energía en calor, puede predecirse a partir de sus propiedades dieléctricas. La constante dieléctrica (ϵ') está relacionada con la capacidad de almacenar energía eléctrica cuando se somete a un campo electromagnético, y el factor de pérdida dieléctrica (ϵ'') influye en la conversión de la energía electromagnética en energía térmica. La permitividad (ϵ^*) es la capacidad de una sustancia de almacenar energía eléctrica en un campo eléctrico y se puede calcular con base en los parámetros antes descritos por medio de la siguiente ecuación (Peng y col 2013).

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

Donde $j = \sqrt{-1}$

4. Aplicaciones del microondas.

Industrialmente, existen muchas aplicaciones para el microondas. La producción de pasteles y panes es un uso popular de este sistema. A través de la aceleración del horneado por microondas, se puede obtener un mejor rendimiento en la producción de este tipo de alimentos. El microondas es utilizado en conjunto con el calentamiento convencional en horno, así se pueden evitar los problemas de la falta de formación de corteza, o el oscurecimiento característico. Las ventajas son más visibles en harinas de trigo suave con bajo contenido proteínico y alta actividad de amilasas. Adicionalmente, el calentamiento con microondas inactiva estas enzimas lo suficientemente rápido para prevenir la degradación extensiva del almidón, y evitar producir, consecuentemente, suficiente CO₂ y vapor para dar lugar a un producto altamente poroso (Şumnu y col 2000; Shaheen y col 2012).

Otra aplicación es en el descongelado y atemperado de alimentos. La congelación es un método muy eficaz en la conservación de los alimentos. Utiliza bajas temperaturas para disminuir la actividad metabólica propia del alimento, o de los microorganismos presentes, además de que disminuye la actividad de agua por la formación de cristales. En alimentos conservados por congelación, pero cuyo consumo implica primero descongelarlos, la calidad final del alimento se puede deteriorar si no se utiliza un método adecuado, ya que puede ocurrir una desnaturalización de proteínas y deterioro de textura (Fennema 2000).

Otro proceso donde se ha utilizado es en el secado. Este método de conservación de alimentos tiene como fin disminuir la actividad de agua a través de la remoción total o parcial del agua que se contiene sin afectar la composición química, y afectar lo menos posible el aspecto físico. Consta en dos fases, una de velocidad constante, donde la resistencia es externa, y la fase de velocidad decreciente, donde la resistencia es interna (Zhang y col 2006; Heredia y col 2007).

Existen muchos métodos tales como el secado al sol, liofilizado, secado con aire, osmótico entre otros, en los cuales se ha aplicado microondas para aumentar la velocidad de secado con la elevación de la velocidad de transferencia de masa. La utilización del microondas aunado a otro método presenta oportunidades únicas de avances en técnicas de secado. La combinación de los métodos implica una reducción en los tiempos de secado, mientras la temperatura del producto esté controlada, esto provoca un impacto positivo en la calidad al final del proceso (Sagar y Kumar 2010).

La pasteurización y esterilización de alimentos, son conceptos relacionados con el efecto de la temperatura sobre parámetros microbiológicos de los alimentos. El fin de la pasteurización es utilizar un tratamiento térmico para eliminar patógenos clave, e inactivar bacterias para asegurar la inocuidad de un alimento. Frecuentemente la leche y los jugos son sometidos a este proceso. Pero este tipo de tratamiento no elimina las esporas bacterianas. La esterilización, por otro lado, es un tratamiento térmico más severo aplicado a los alimentos. El calor aplicado debe ser tal que ningún microorganismo debe de capaz de reproducirse en el alimento, en condiciones normales no refrigeradas, en otras palabras, alcanzar la esterilización comercial (Ahmed y Ramaswamy 2004).

Los procesos convencionales industriales, utilizan vapor o agua caliente como medio de calentamiento. Sin embargo, se ha utilizado microondas para la generación de calor como alternativa en estos procesos, lo cual reduce los tiempos de exposición, manteniendo la calidad de los productos (Zhuosi y col 2010; Chandrasekaran y col 2013).

5. Escaldado con microondas.

Hay reportes (Severini y col 2004; Dorantes-Alvarez y col 2011; Ruiz-Ojeda y Peñas 2013) de investigaciones que utilizan microondas como alternativa de calentamiento durante el proceso de escaldado. Una de las mayores ventajas que ofrece esta tecnología es que el tiempo de exposición es más corto cuando se compara con el escaldado ordinario. Además, el efecto que presenta sobre la degradación de compuestos es menor, así como la lixiviación de componentes solubles, y los cambios en el contenido de compuestos volátiles también, asegurando una mayor retención de características sensoriales.

Esto concuerda también con lo investigado en vitamina C (Ponne y col 1994), en espinaca escaldada con microondas. Los autores de este estudio concluyeron que la retención del contenido de esta vitamina, asimismo de otros atributos de calidad, fue mayor que el escaldado tradicional. Por otro lado, Brewer y col (1994), investigaron el impacto del escaldado con microondas sobre la textura de frijoles, y concluyeron que, aunque hay un ablandamiento del tejido, este proceso mantiene mejor la firmeza que el escaldado con agua caliente y vapor.

El escaldado con microondas generalmente se aplica en alimentos sumergidos en agua, o en soluciones ácidas o salinas (Chandrasekaran y col 2013). Sin embargo, no se han encontrado reportes que utilizan este método sobre hortalizas sin inmersión en agua.

IV JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la industria de los alimentos se enfrenta a una creciente demanda en la calidad de productos elaborados, por lo que está en búsqueda permanente de mejorar los procesos en orden de alcanzar aquellos atributos deseados por los consumidores.

El escaldado es una etapa previa en diferentes procesos de los alimentos, tales como el congelado, secado y enlatado. Se puede definir como una operación unitaria cuyo fin es, a través del empleo de energía térmica, inactivar enzimas de interés con propósito de evitar la deterioración enzimática. Produce, además, otros beneficios, tales como, la disminución de la carga microbiana y la remoción de aire, entre otros.

Comúnmente la aplicación del escaldado tiene como base sumergir las frutas u hortalizas de interés en agua caliente, soluciones ácidas o utilizar vapor como medio de calentamiento. Sin embargo, en este proceso la temperatura se ajusta de acuerdo a un objetivo específico, y si se excede puede ocasionar diferentes efectos adversos, tales como lixiviación de componentes solubles en el agua, ablandamiento de tejidos vegetales y degradación de compuestos termosensibles.

El empleo de microondas es una tecnología alternativa en el procesamiento de alimentos, cuyo principio radica en inducir un campo magnético oscilante sobre el alimento de interés para elevar su temperatura. Se fundamenta en las interacciones de moléculas polares, principalmente agua (mayor componente de frutas y vegetales), que cambian de dirección de rotación por la acción del campo magnético y producen calor por la fricción entre ellas.

El tomate es una hortaliza de suma importancia en México y en el mundo, tanto por su impacto social, como económico. Existe una gran diversidad de productos industriales derivados del tomate, entre los que destacan las pastas, salsas, jugos y puré, entre otros.

En el proceso de industrialización del tomate, primeramente los frutos se trituran para obtener jugo, la ruptura de las células vegetales induce la liberación de las enzimas propias del tomate y el contacto con sus respectivos sustratos, por lo que los procesos metabólicos aceleran su velocidad y ocasionan una degradación y/o producción de componentes. Esto afecta los atributos físicos, nutrimentales y sensoriales.

Las enzimas de interés en tomate son las pectinasas (pectil metil esterasa y poligalacturonasa), ya que son responsables de la degradación de las pectinas que mantienen y/o modifican la firmeza y consistencia de los productos terminados. Sin embargo, la estabilidad térmica de la poligalacturonasa es alta, por lo que un proceso térmico diseñado para inactivarla acarrea modificaciones en las características sensoriales (sabor, olor, textura), también degrada el ácido ascórbico en el producto final.

Con base en lo anterior, el presente trabajo se enfocó en optimar el proceso de escaldado de tomate utilizando microondas tanto sin inmersión del fruto en agua, como con inmersión del fruto en agua, así como, el método de escaldado tradicional de tomate (jugo calentado a baño maría). Los tres métodos antes mencionados se contrastaron para determinar cuál de ellos permite obtener un jugo de tomate escaldado con los mejores atributos físicos y nutrimentales.

V OBJETIVOS

A Objetivo general

Contrastar la inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Grape, empleando escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión en agua.

B Objetivos específicos

- 1.- Optimizar las condiciones del proceso de escaldado tradicional (ET) de jugo de tomate, con base en la combinación de temperatura y tiempo; empleando como variables de respuesta: diferencia total de color, consistencia, retención de ácido ascórbico y actividad remanente de poligalacturonasa.
- 2.- Identificar las mejores condiciones en la inactivación de tomates por medio del escaldado con microondas (EM) bajo los distintos tratamientos de temperatura y tiempo.
- 3.- Optimizar el escaldado con microondas, sin inmersión en agua (EMSI), de tomates a las diferentes combinaciones de temperatura y tiempo.
- 4.- Comparar con base en parámetros físicos, nutrimentales y enzimáticos los métodos de escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión en agua de jugo de tomate, obtenido con las condiciones óptimas de procesamiento.

VI MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

1 Materia prima

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad *grape*, el cual fue facilitado por Agrícola Chaparral, de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, durante los meses de Febrero-Julio de 2016. Se seleccionó con base en las siguientes características: estado de madurez número 4 (rosa), con base a USDA (2016) libre de defectos físicos, con forma y tamaño uniforme.

Las muestras de tomates se lavaron con una solución de 200 ppm de cloro, se secaron perfectamente y se mantuvieron en refrigeración a 10 °C para evitar el daño por frío. Se consideró no utilizar tomates con más de dos días de almacenamiento debido al cambio en el estado de madurez.

a Equipo microondas.

Para la investigación se utilizó un horno de microondas comercial (Frigidaire, FMY141D1PGMM, Chihuahua, México) con dos modificaciones: un controlador de retroalimentación de bucle cerrado y un ventilador para la extracción de la humedad de la cámara (Pert y col 2001).

El controlador es de tipo proporcional, integral y derivativo (PID, Honeywell DC1010, Florida, USA), cuya función radica en corregir eficazmente, y en el mínimo tiempo, los efectos de las perturbaciones entre la señal de referencia y la señal del sensor instalado. Para ello, el parámetro de acción integral (I) se ajusta con la finalidad de que el error disminuya hasta cero, de manera asintótica con el tiempo. Además, a través de la función derivativa (D) se predicen

valores sobre la respuesta de salida del proceso. Si los parámetros son los adecuados, el proceso es estable (Moreno 2001).

Se construyó un termopar de tipo T como sensor y se recubrió la punta con adhesivo epóxico de alta conductividad térmica para evitar que las microondas del horno afectaran los valores de temperatura.

Se realizaron pruebas preliminares sobre los parámetros P, I y D, encontrando la mejor combinación en $P=10$, $I=10$, y $D=0$. El proceso fue estable, con una respuesta rápida para encender el magnetrón si la temperatura de trabajo no se alcanzaba y para apagarlo si se excedía.

B. MÉTODOS.

1 Escaldado tradicional (ET)

Una muestra de tomate (500g) se licuó en una licuadora (Oster, BPST-02, USA) con el fin de obtener el jugo. La pulpa se tamizó a través de una malla de 0.2 mm para obtener alrededor de 300 mL de jugo de tomate, el cual se colocó en un vaso de precipitado de 600 mL y se calentó en baño María (94°C) de inmediato. Se agitó manualmente hasta que el jugo llegara a la temperatura deseada, y a partir de ese momento se mantuvo la temperatura durante los diferentes tiempos de cada tratamiento. El jugo fue enfriado en baño de hielo con agitación constante hasta alcanzar temperatura ambiente. Los análisis fueron realizados inmediatamente después sobre el jugo inactivado.

2. Escaldado con microondas (EM)

500g de tomate se sumergieron en un vaso de precipitados de 2 L con agua a punto de ebullición. Inmediatamente el vaso se colocó en el horno de microondas. El sensor se instaló en el agua caliente. Se encendió el microondas y cuando la temperatura deseada se alcanzó, se mantuvo durante los diferentes tiempos de cada tratamiento.

Seguido, los tomates inactivados enzimáticamente, fueron enfriados con abundante agua hasta la temperatura ambiente. A partir de ese momento se trituraron en una licuadora Oster y se filtró a través de una malla de 0.2 mm para obtener el jugo de tomate.

3. Escaldado con microondas, sin inmersión en agua (EMSI)

La muestra de tomate (500g) se colocó en un vaso de precipitado de 600 mL, y los frutos para el control de temperatura llevaron instalado un termopar tipo T.

El proceso consistió en calentar los tomates hasta las temperaturas deseadas, y a partir de ese momento se mantuvo constante hasta cumplir los diferentes tiempos de cada tratamiento. Los tomates, después del proceso de EMSI, fueron enfriados con abundante agua fría. De inmediato, se utilizó una licuadora Oster para obtener el jugo de los frutos, el cual fue tamizado a través de un tamaño de malla de 0.2 mm. El jugo fue utilizado en los minutos siguientes en los análisis pertinentes.

4. Parámetros físicoquímicos.

a Diferencia total de color (ΔE)

Para la medición de la diferencia total de color se utilizó la metodología de Yam y Papadakis (2004) con modificaciones. El jugo recién conseguido de cada tratamiento se filtró a través de tela de organza y depositaron 100 mL en un vaso de precipitados de 200 mL colocado sobre fondo color blanco. La medición de los parámetros L, a y b se obtuvo con un colorímetro triestímulo (Minolta, Chromameter CR-200, Osaka, Japón). Se realizaron cinco disparos sobre la superficie de cada muestra, registrando los valores, tanto de jugo fresco como en jugo escaldado. La calibración del equipo consistió en tres disparos sobre la carta de color blanco estándar con valores predefinidos de $Y=93.50$, $x=0.3139$ y $y=0.3196$.

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

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

Donde:

ΔE = Diferencia total de color en el jugo escaldado

L_f , a_f , y b_f = Parámetros de color de referencia del jugo de tomate sin escaldar.

L , a y b = Parámetros de color de las muestras de jugo de tomate escaldado.

b. Índice de consistencia (K)

Para la medición del índice de consistencia (K) se siguió la metodología descrita por Avila-Gaxiola y col (2015). Se utilizó un viscosímetro de Brookfield digital modelo DV II (Brookfield Engineering, USA). Inicialmente se determinó el número de eje del equipo que mejor funciona con las muestras de jugo de tomate. Se consideró deseable, que los valores α del equipo estuvieran en un intervalo de 10-100, como lo recomienda Mitschka (1982). Las muestras para las mediciones consistieron en un promedio de 300 mL de jugo de tomate a temperatura ambiente.

El esfuerzo de corte (τ) se calculó a partir de los valores α del equipo y de un factor de conversión (k_{α_r}), que es específico para la geometría del eje. Se calculó la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) utilizando la velocidad de rotación (N) y un factor de conversión ($k_{N_{\dot{\gamma}}}$) que depende del número de eje y del índice de comportamiento de flujo (n).

Para calcular el valor de K , se utilizó el modelo de la ley de la potencia (Avila-Gaxiola y col 2015): $\tau = K \dot{\gamma}^n$

En donde:

τ = Esfuerzo de corte (Pa)

K = Índice de consistencia (Pa·sⁿ)

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de corte (s⁻¹)

n = Índice de comportamiento de flujo (adimensional)

5. Parámetros nutrimentales

a Retención de ácido ascórbico.

El contenido de ácido ascórbico se cuantificó utilizando la técnica 967.21 de la A.O.A.C (2012), la cual es específica para preparaciones de alimentos y jugo de tomate, en un ensayo de titulación con el indicador 2,6 diclorofenolindofenol (DCPI).

A 30 mL de jugo fresco de tomate, filtrado a través de tela de organza, se agregaron 30 mL de ácido metafosfórico [HPO_3 (30g/L) + Ac. Acético (80 mL/L)]. La mezcla se denominó volumen total (V).

Se preparó un estándar de ácido ascórbico (1 mg/mL).

A tres alícuotas de 2 mL de la solución estándar de ácido ascórbico se agregó 5 mL de HPO_3 . Se titularon rápidamente con DCPI en una bureta de 50 mL hasta que una coloración rosa ligera persistió durante más de 5 segundos. El promedio de las tres titulaciones se utilizó en una corrección en las mediciones de la muestra. Se calculó y expresó la concentración de DCPI como mg de ácido ascórbico equivalente a 1 mL de reactivo. La solución de DCPI se estandarizó diariamente.

Adicionalmente, se hizo una mezcla agua- HPO_3 (el agua en el mismo volumen que aquel obtenido en la titulación de ácido ascórbico con DCPI) y se tituló nuevamente con DCPI. El gasto promedio se utilizó en la corrección de los valores durante el ensayo con muestra.

La determinación se realizó al titular tres alícuotas de 5 mL de la mezcla jugo- HPO_3 con DCPI en una bureta de 50 mL. Al promedio de las titulaciones se sustrajo el gasto de DCPI en el blanco.

El contenido de ácido ascórbico se calculó por medio de la siguiente ecuación.

$$Ac. Ascórbico = (X - B) * \left(\frac{F}{E}\right) * \left(\frac{V}{Y}\right)$$

Dónde:

X= mL de DCPI gastados para titular la muestra.

B= Promedio de mL gastados para titular el blanco de $HP0_3$

F =mg de ácido ascórbico equivalente a 1.0 mL de solución estándar de DCPI.

E= Volumen en mL de la alícuota ensayada.

V= Volumen total de la solución de prueba (Muestra + $HP0_3$)

Y= Volumen de la alícuota tomada para la titulación.

Los resultados se reportaron como el porcentaje de retención de Ac. Ascórbico, mismo que se calculó al comparar el contenido de una muestra de jugo sin procesar contra las muestras procesadas de jugo.

6. Parámetros enzimáticos.

a. Actividad remanente de poligalacturonasa

La actividad enzimática de poligalacturonasa (PG) se determinó siguiendo la metodología descrita por Anthon y col (2002), la cual consiste en dos fases: la extracción de la isoenzima de interés (PG1 o PG2), y el ensayo enzimático al medir la producción de azúcares reductores a partir de ácido poligalacturónico.

1) Extracción de la isoenzima.

5 mL de jugo de tomate se agregaron a un tubo de nalgono de 50 mL y se añadió 10 mL de agua. Se ajustó el pH a 3.0 con 0.1 N HCl, y la muestra se centrifugó a 10,000g por 15 min a 4 °C. Se desechó el sobrenadante con cuidado y el precipitado fue resuspendido en 15 mL de agua con ayuda de un vórtex, nuevamente se centrifugó a las condiciones descritas anteriormente. El precipitado se homogenizó en 7.5 mL del buffer de fosfatos conteniendo 0.5 M NaCl para la extracción de PG2, o 1.2 M NaCl para PG1. La muestra se colocó en baño de hielo por 30 min, después fue centrifugada con el mismo criterio. El sobrenadante fue recolectado para el ensayo enzimático.

2) Ensayo enzimático.

Los extractos salinos fueron evaluados midiendo colorimétricamente los azúcares reductores provenientes de ácido poligalacturónico en su reacción con la poligalacturonasa. En tubo de ensayo, se realizó una mezcla de 1.3 mL del extracto enzimático, 0.2 mL de 1 M NaCl, y 0.5 mL de ácido poligalacturónico (1%) en 50 mM buffer de citratos (pH 4.5).

Se incubó una alícuota de 0.2 mL de la mezcla en un baño María (Modelo 9500, Fischer Scientific, USA) a 37 °C por 30 minutos. La reacción se detuvo con la adición de 5 mL de buffer de carbonatos (54.3 g/L Na₂CO₃, y 24.2 g/L NaHCO₃).

Para la determinación se preparó un reactivo de coloración a partir de dos soluciones. Solución A: ácido bicinonínico al 0.46% en buffer de carbonatos. Solución B: CuSO₄ y L-Serina, 1.26 g/L y 1.24 g/L, respectivamente. Ambas se mezclaron en proporciones iguales para su uso inmediato en cada medición.

Nuevamente, en tubo de ensayo de vidrio, a 0.6 mL de la reacción detenida se agregaron 1.9 mL de agua y 1.6 mL del reactivo de coloración. Cada tubo de ensayo fue cubierto con aluminio en la parte superior, esto con el fin de evitar el cambio de volumen debido a evaporación de la mezcla, o a condensación de humedad en el ambiente.

Las muestras se colocaron en un baño María a 80 °C durante 30 minutos. Posteriormente se dejaron enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente. Se utilizó 2 mL de la mezcla para la lectura que se realizó a 560 nm en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation, Genesys 10uv, Madison, EUA). El ajuste a cero fue realizado con agua desionizada. La actividad remanente de la enzima se calculó con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ de actividad remanente} = (\text{abs muestra} / \text{abs blanco}) * 100$$

7. Métodos estadísticos

a Diseño experimental

Para este proyecto se utilizó un diseño central compuesto rotatable con dos factores: temperatura (60 a 90°C) y tiempo (1 a 6 min) con cinco niveles de variación para cada factor haciendo un total de 13 tratamientos (**Cuadro 5**) (Myers y Montgomery 1971; Montgomery y Jaime 1991).

Cuadro 5. Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización del proceso de escaldado.

X1, codificada	X2, codificada	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
-1	-1	64.4	1.7
1	-1	85.6	1.7
-1	1	64.4	5.3
1	1	85.6	5.3
1.41421	0	90	3.5
-1.41421	0	60	3.5
0	1.41421	75	1
0	-1.41421	75	6
0	0	75	3.5
0	0	75	3.5
0	0	75	3.5
0	0	75	3.5
0	0	75	3.5

b Optimización.

Para optimizar las condiciones de proceso 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 respuestas de variables 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 influenciada por otra. Además, esta metodología puede ajustar los valores experimentales para generar modelos matemáticos de predicción (Baş y Boyacı 2007).

c Análisis de datos.

Las condiciones óptimas de procesamiento se obtuvieron con el método numérico la metodología reportada por Derringer y Suich (1980), para poder obtener las condiciones óptimas de procesamiento. Las variables de respuesta utilizadas fueron: ΔE , K , retención de Ac. Ascórbico y actividad remanente de PG1.

Se utilizó el análisis de regresión a los valores experimentales obtenidos en cada una de las variables de respuesta antes mencionadas, donde los términos no significativos ($p > 0.1$) fueron descartados para determinar los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta, y de esta manera obtener modelos con mejor ajuste. A través del software Desing Expert 7.0, se analizaron los datos y obtuvieron los gráficos de superficie de respuesta.

Para que un modelo de predicción sea repetible, es necesario cumplir con cuatro condiciones: valor P del modelo ($p < 0.05$), un coeficiente de determinación ajustado ($R^2 > 0.8$), coeficiente de variación (C.V. $< 10\%$) y que pase la prueba de falta de ajuste. 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: valores mayores del índice de consistencia (K) y retención de Ac. Ascórbico, y valores menores para la diferencia total de color (ΔE) y actividad remanente de PG1.

d Validación del modelo de predicción.

Se realizaron 5 réplicas de cada proceso de escaldado optimizado ($n=5$). Se obtuvieron muestras de jugos a las cuales se les realizaron análisis físicos, nutrimentales y enzimáticos. Las variables de respuesta fueron las siguientes: ΔE , K , retención de Ac. Ascórbico y actividad remanente de PG1. Se verificó que la media de cada variable de respuesta estuviera dentro del intervalo de confianza para los valores óptimos predichos por el modelo.

e Contraste de los métodos de escaldado.

Para la comparación de los tres métodos de escaldado, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial completamente al azar con 3 niveles (ET, EM y EMSI). Se llevaron a cabo 5 réplicas ($n=5$) de cada método y para la comparación de datos de las variables de respuesta se usó la prueba de Fisher (LSD) con un $\alpha=0.05$ en el software estadístico STATGRAPHICS 5.0.

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A MODELOS EXPERIMENTALES DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO.

1. Escaldado tradicional.

a Parámetros fisicoquímicos

1) Diferencia total de color (ΔE)

En la **Figura 7** se muestra el ΔE en jugo de tomate obtenido en función de la temperatura y el tiempo de escaldado tradicional. Con respecto al color, podemos observar que el tratamiento de mayor diferencia correspondió a temperaturas elevadas (90°C). Los valores experimentales para esta variable de respuesta se encontraron en el intervalo de 11.4-54.1. En la superficie de respuesta se observa que al incrementar la temperatura de escaldado se obtienen mayores valores de ΔE . También se muestra una tendencia en la que la exposición por tiempos cortos y temperaturas bajas, ocasiona los menores valores de ΔE .

$$\Delta E = -61.21 + 0.61 T + 28.95 t - 3.37 t^2$$

En el modelo de predicción para la diferencia total de color la interacción temperatura y tiempo, además del término cuadrático de la temperatura no fueron significativos. Además, explicó el 96% de la variación total de los datos ($p > 0.0001$), no presentó falta de ajuste ($p = 0.1509$) y el coeficiente de variación fue menor al 10% (4.52), por lo que se podría decir que el modelo es repetible.

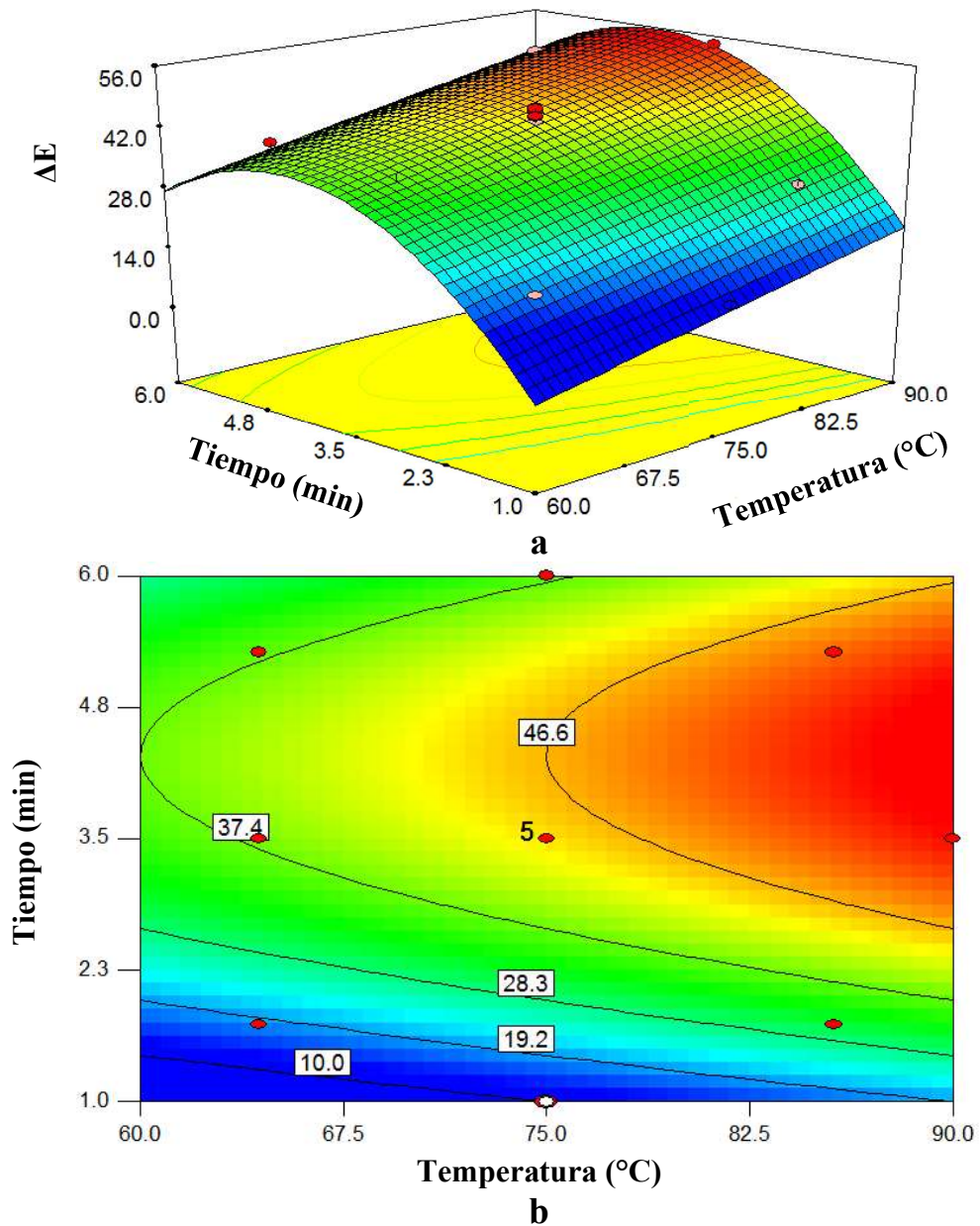


Figura 7. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el ΔE de jugo de tomate por escaldado tradicional.

El color rojo en tomates, asociado en particular al licopeno, cambia su conformación espacial *trans* y se isomeriza en su contraparte *cis*, con la exposición prolongada a las altas temperaturas, instancia que ocasiona un cambio en los valores de luminosidad (L), y por ende en el color total (Rodrigo y col 2007; Urbonaviciene y col 2012).

Dicho comportamiento se reporta por otros autores (Sarr y Tsai 2008; Nisha y col 2011). Los procesos de escaldado a baja temperatura de tomate (*cold break*) alrededor de 60°C, mantienen en mayor proporción la integridad del licopeno, lo que resulta en una retención de color superior comparada con los procesos térmicos a temperatura elevadas, este tipo de condiciones se utilizan industrialmente en la elaboración de jugos de tomate y bebidas derivadas.

b) Índice de consistencia (*K*)

El comportamiento de *K*, con el ET, se resume en la **Figura 8**. Los valores experimentales se encontraron en el intervalo de 0.20- 0.41 Pa·s⁻¹

La tendencia mostrada de los valores *K* tiene dos puntos con comportamiento ascendente, uno a temperatura elevada (90°C) y tiempos prolongados, mientras que el otro a temperatura baja (60°C) y tiempos cortos. La exposición por breves periodos y temperaturas elevadas, mostró valores pequeños de *K* (0.20 Pa·s⁻¹). El modelo de predicción fue cuadrático, con significancia en todos los términos:

$$K = -0.67 + 0.04 T - 0.38 t + 3.9 \times 10^{-3} Tt - 3.28 \times 10^{-2} T^2 + 4.2 \times 10^{-3} t^2$$

El modelo de predicción explicó el 93% de la variación total de los datos ($p > 0.0001$), no presentó falta de ajuste ($p = 0.1082$) y el coeficiente de variación fue de 5.26 %, menor a lo recomendado (10%), por lo que se podría decir que el modelo es repetible.

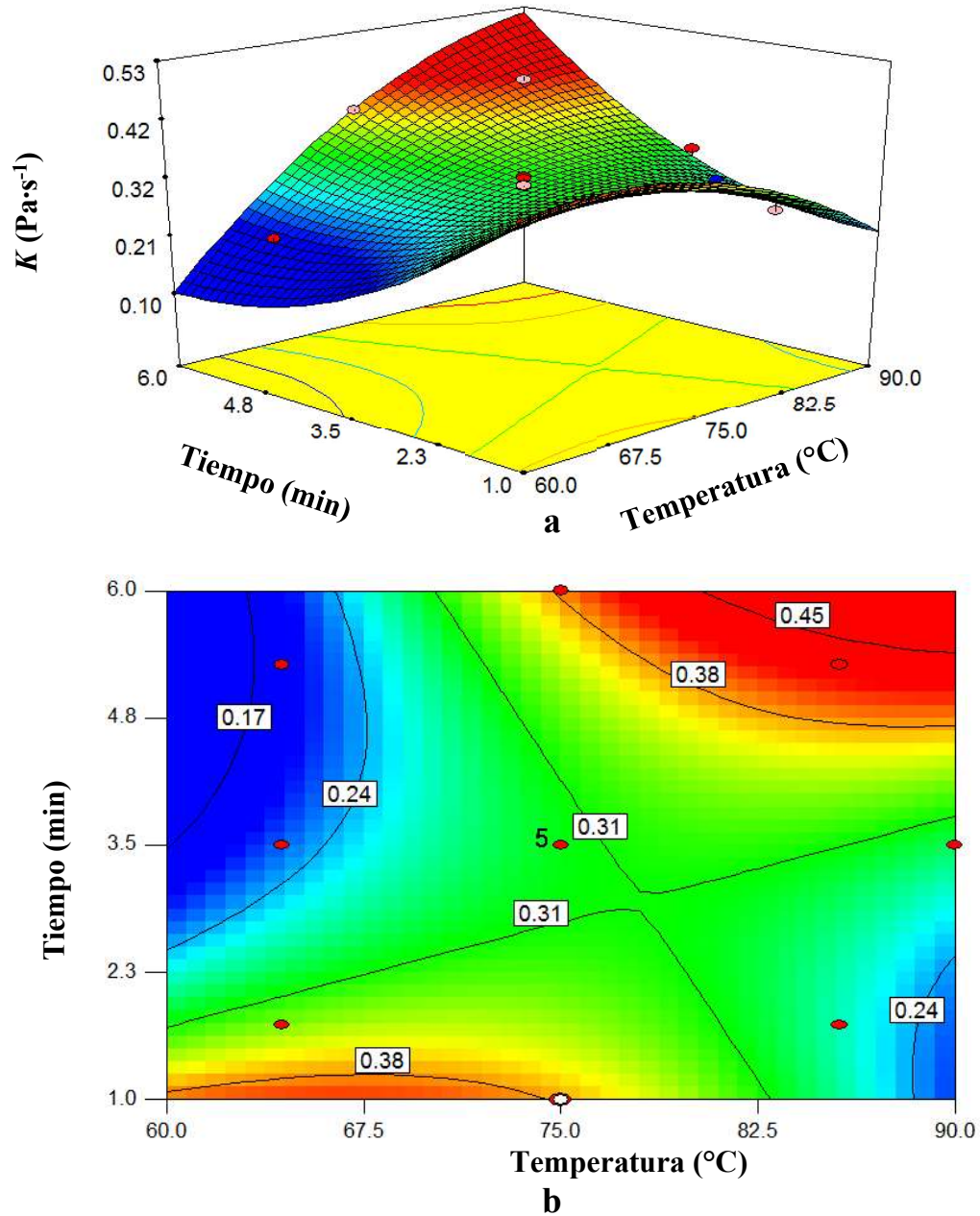


Figura 8. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el índice de consistencia (K) de jugo de tomate por escaldado tradicional.

La consistencia, es uno de los parámetros reológicos de importancia en los productos industrializados de tomate. Comúnmente, una gran proporción del jugo de tomate se concentra en pasta, esta es la materia prima para otras formulaciones como pasta, salsas y puré. El jugo de tomates procesados a baja temperatura (*cold break*), se somete a temperaturas de 60-66 °C, en la cual, la actividad de las enzimas pécticas degrada la pectina, disminuyendo la consistencia de los productos, en este sentido, estas condiciones favorecen las bebidas basadas en jugo de tomate. Por el otro lado, el proceso a alta temperatura (*hot break*), utiliza temperaturas superiores (93-99 °C) para cesar la actividad de estas enzimas, lo que ocasiona un aumento en los valores de K (Barringer 2004).

b Parámetros nutrimentales

1) Retención de Ac Ascórbico.

La tendencia de retención de ácido ascórbico se muestra en la **Figura 9**. Los valores experimentales, para este parámetro nutrimental se encontraron en el rango del 58.5 al 81.9 %. Se puede observar, además, que a temperaturas bajas se obtuvieron los valores más altos, en contraparte, una exposición prolongada a temperaturas alrededor de 90°C presentó la menor retención de ácido ascórbico. A continuación, se presenta el modelo de predicción:

$$\text{RAC (\%)} = 371.97 - 7.18 T - 1.07 t + 0.04 T^2$$

En el modelo de predicción, la retención del ácido ascórbico queda basada en la magnitud de la temperatura y la duración del proceso. Los términos de interacción (Tt) y tiempo cuadrático del tiempo fueron no significativos.

El modelo de predicción explicó el 93% de la variación total de los datos ($p > 0.0001$), no presentó falta de ajuste ($p > 0.2962$) y el coeficiente de variación fue menor al 10 % recomendado (2.87), por lo que se podría decir que el modelo es repetible.

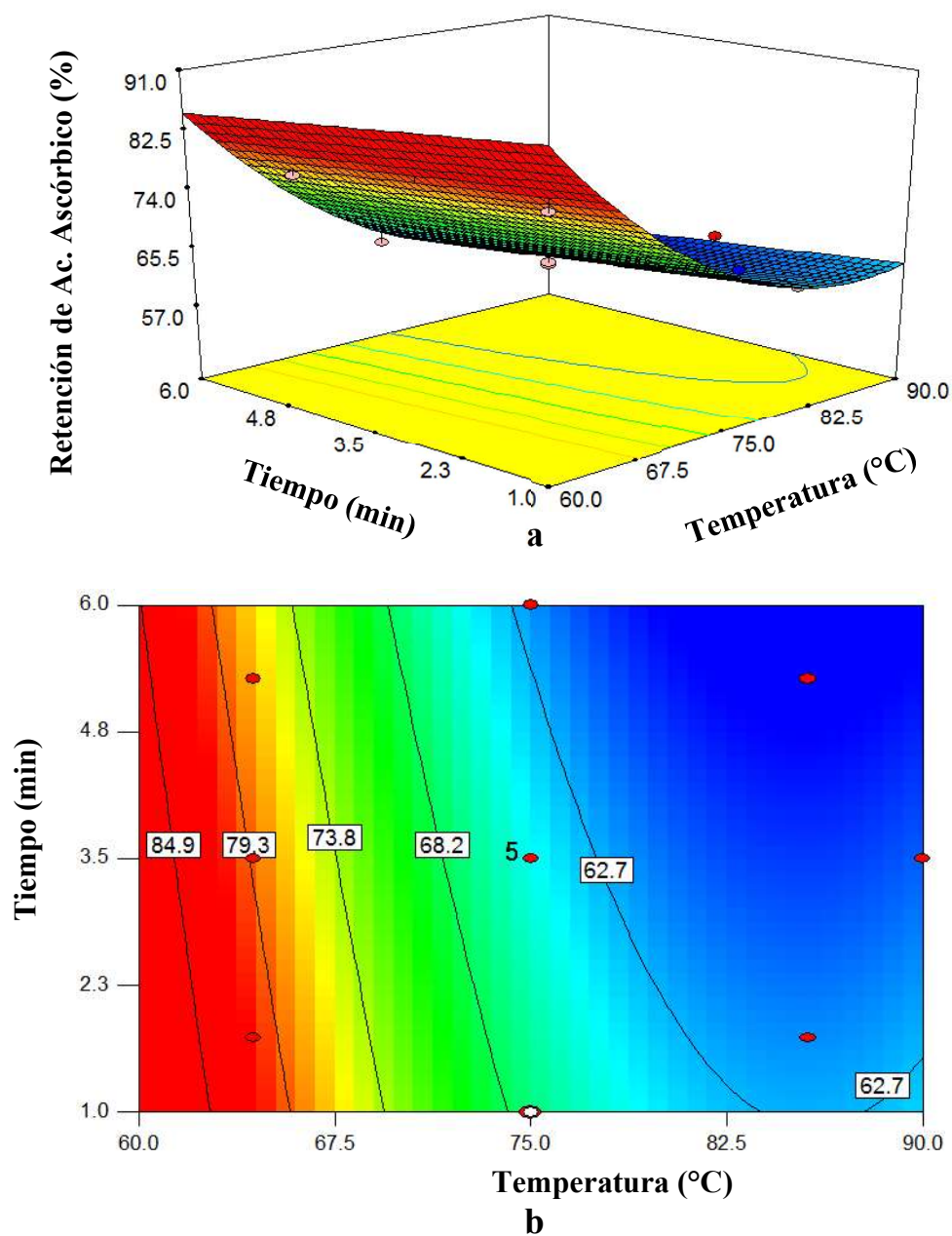


Figura 9. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de retención de ácido ascórbico del jugo de tomate obtenido por escaldado tradicional.

El ácido ascórbico es un componente termolábil. Su mecanismo de degradación depende de varios factores, entre los cuales la temperatura destaca. Procesos térmicos como el escaldado y pasteurizado reducen el contenido de este compuesto (Vieira y col 2000). La tendencia descrita en este trabajo es similar a la reportada por Ishiwu Charles y col (2014), que menciona el efecto de procesos térmicos en el contenido de ácido ascórbico, donde concluye que este compuesto se reduce progresivamente con el tiempo y la temperatura.

En el escaldado tradicional con alta temperatura (*hot break*) de jugo de tomate, bajo condiciones de 90°C y un tiempo de 2 min, Kaur y col (2007), señalaron una reducción de vitamina C de 13.5 a 7.13 mg/100 g de muestra, lo que significa una retención de aproximadamente 52%, valores comparables con los de este trabajo.

c Parámetros enzimáticos

1) Actividad remanente de PG1.

En la **Figura 10** se presentan los valores de la actividad de PG1 en función de la temperatura y el tiempo de escaldado. Los resultados experimentales se encontraron en el intervalo de 82.3-99.8 %. Se observa que, al incrementar tanto la temperatura como el tiempo de escaldado, los valores disminuyeron. Del mismo modo los valores aumentaron a bajas temperaturas y tiempos cortos. El modelo de predicción fue el siguiente:

$$PG1 = -216.56 + 8.87 T + 10.51 t - 0.11 Tt - 0.06 T^2 - 0.56 t^2$$

Se encontró que el modelo matemático sigue un orden cuadrático, no presentó falta de ajuste ($p=0.1295$), además de tener un coeficiente de variación menor al 10% (1.58%) y explicar el 92% de los datos experimentales.

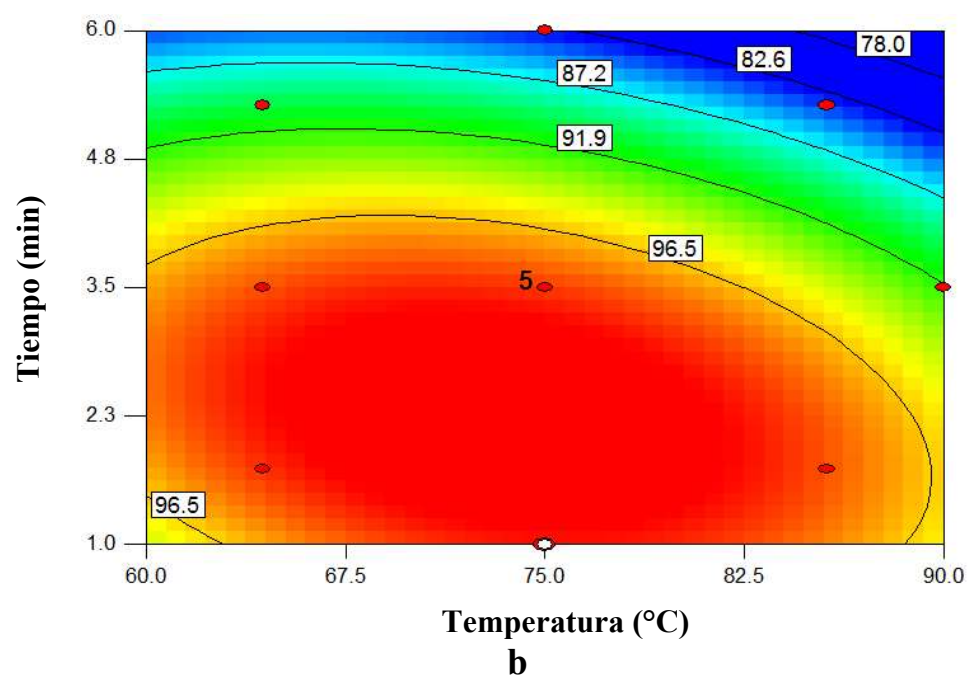
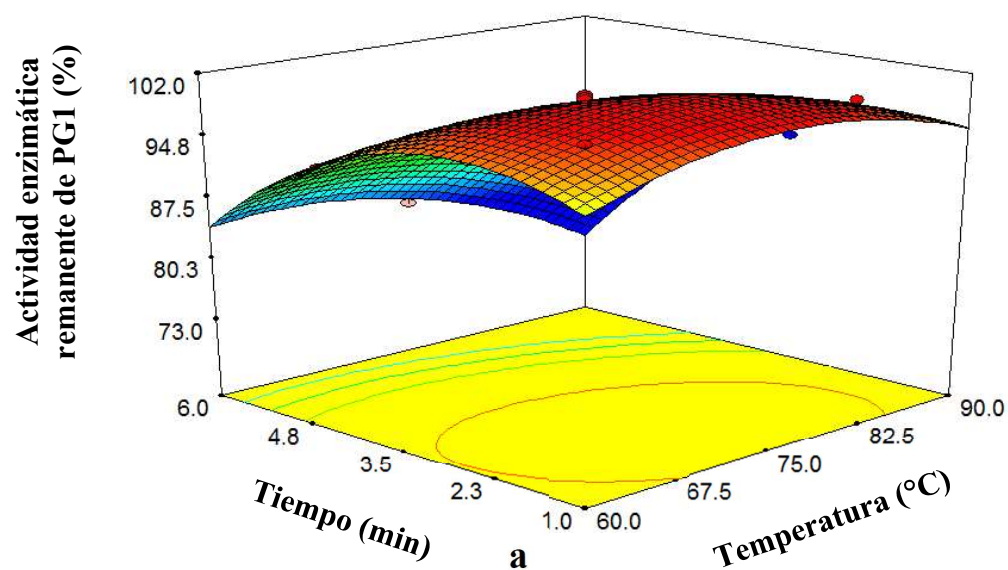


Figura 10. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la actividad remanente de PG1 de jugo de tomate obtenido por escaldado tradicional.

En la literatura, se ha reportado la gran estabilidad térmica de la PG, en particular de su isoenzima más termoestable. Lopez y col (1997), en sus trabajos sobre PG en tomate, determinó los valores D y z de su actividad, encontrando que, a 87 °C, se necesita 15.9 min para reducir la actividad de dicha enzima 90%. Extrapolando los resultados, se puede predecir que, a tiempos de exposición menores o temperaturas menores, se puede obtener una baja inactivación de la PG. Barringer (2004) describe que durante el procesamiento de tomate a baja temperatura (*cold break*), con condiciones cercanas a 60-66 °C, la actividad enzimática se promueve, es decir, no hay margen de inactivación, instancia que puede explicar los altos valores de PG1 de este trabajo.

2. Escaldado con microondas

a Parámetros fisicoquímicos

1) Diferencia total de color (ΔE)

En la **Figura 11** se muestra el comportamiento de ΔE de jugo de tomates escaldados utilizando el EM, a los diferentes tiempos y temperaturas descritas en la metodología. Se observa un incremento en los valores cuando la temperatura y el tiempo de exposición se elevan. Siendo el punto más alto (69.5) encontrado en la combinación de 85.6 °C y 5.3 min. Asimismo, los menores valores se encontraron a temperaturas bajas (60°) y tiempos cortos (1 min). Los valores de esta variable de respuesta se encontraron en el intervalo de 6.7-69.5. El modelo de predicción obtenido fue el siguiente:

$$\Delta E = 20.68 - 0.29 T - 31.23 t + 0.53 Tt$$

El modelo de predicción tuvo como término significativo la temperatura y tiempo, además de su interacción. Además, no presentó falta de ajuste ($p=0.1749$), se obtuvo un coeficiente de variación de 2.35%, y explicó el 98% de los valores experimentales. Con estas condiciones se puede decir que el modelo es bueno y repetible.

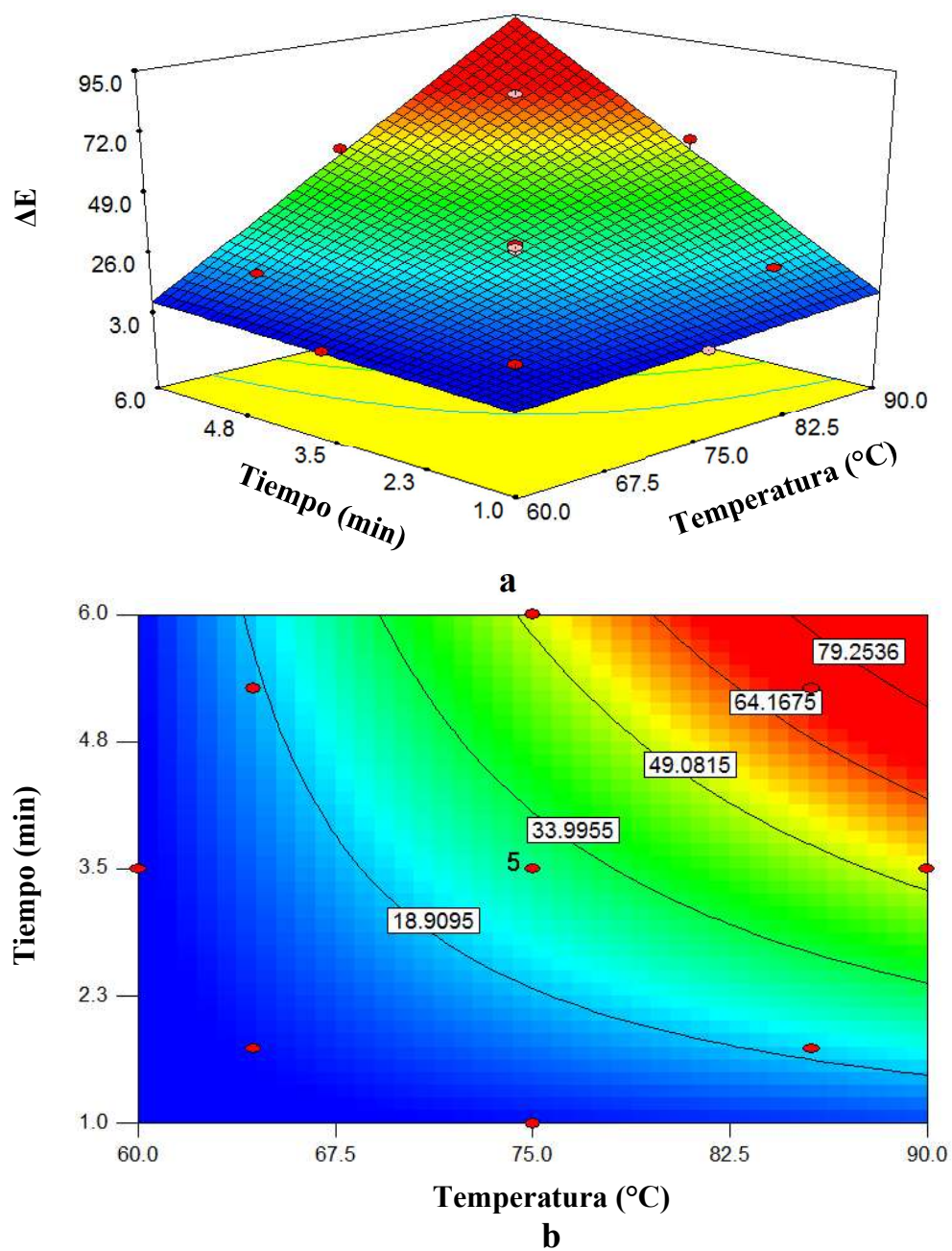


Figura 11. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el ΔE de jugo de tomates obtenidos mediante el escaldado con microondas.

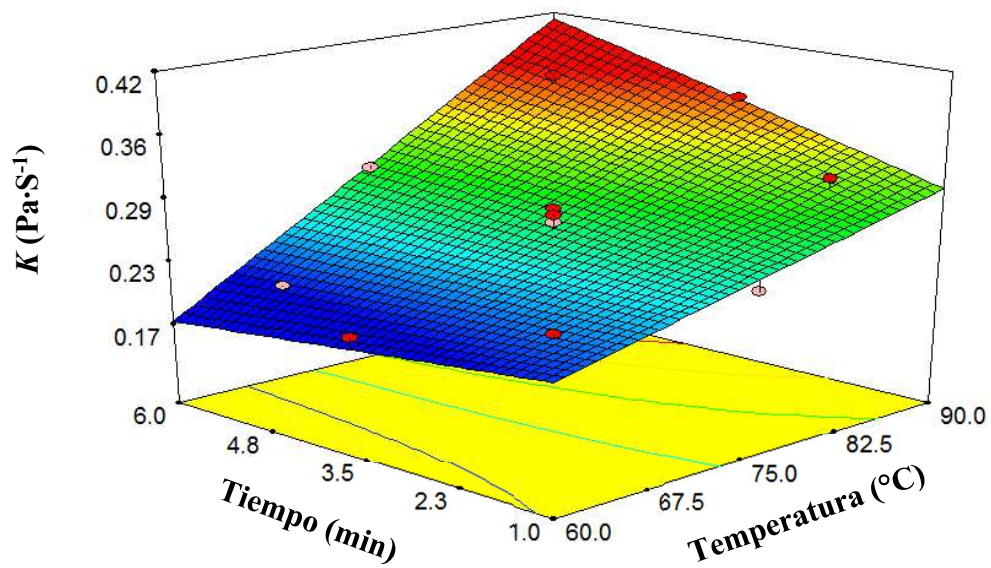
2) Índice de consistencia (K)

El comportamiento de K en función de la temperatura y tiempo de proceso para el EM se muestra en la **Figura 12**. La consistencia presentó valores bajos en todo el intervalo de tiempo (1-6 min) 60 °C. Los valores aumentaron conforme la temperatura se elevó, encontrando un máximo en $T=85.6$ °C y $t=6$ min. El intervalo de valores de los datos experimentales correspondió a $0.21-0.37 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$. A continuación se muestra el modelo de predicción.

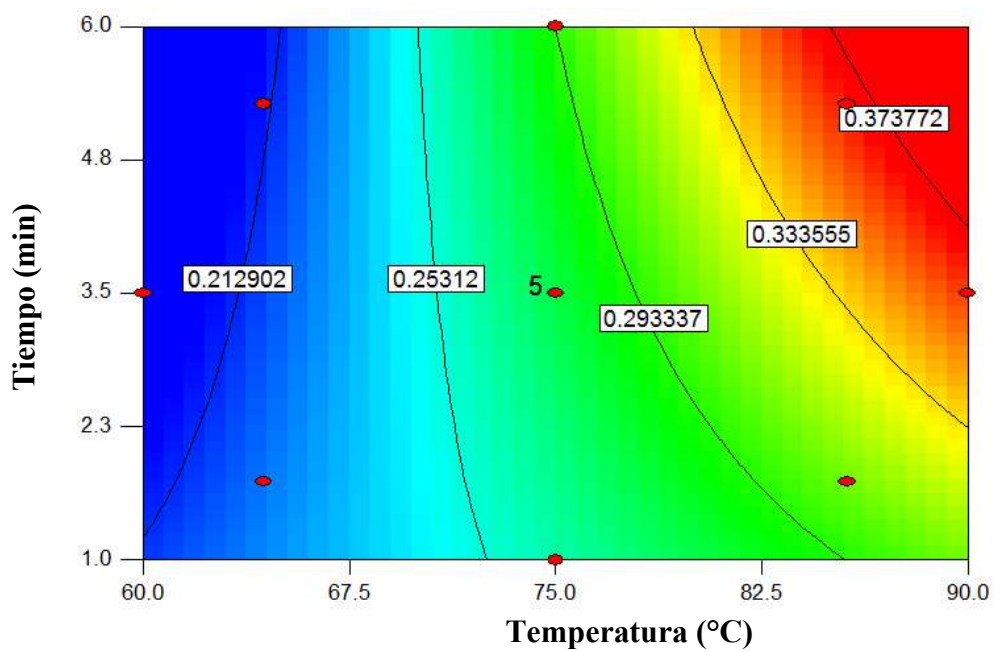
$$K = 0.097 + 2.09 \times 10^{-3} T - 0.06 t + 9.92 \times 10^{-4} Tt$$

El modelo de predicción para esta variable de respuesta se ajustó con términos significativos para tiempo, temperatura y la interacción. Dicho modelo no presentó falta de ajuste ($p=0.5283$), tuvo un coeficiente de variación menor al 10% (9.79) y explicó el 96% de los datos experimentales, bajo estos criterios se puede considerar al modelo como adecuado y repetible.

El comportamiento de los valores es similar al reportado por diversos autores (Bayod y col 2008; Augusto y col 2011, 2012). Esto puede deberse a que a temperaturas menores (cercanas al nivel bajo) las enzimas pécticas mantienen su función, favoreciendo la hidrólisis de las pectinas de la pared celular. Por tanto, se presentó un impacto considerable en la consistencia.



a



b

Figura 12. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre K de jugo de tomate obtenido mediante el escaldado con microondas.

a Parámetros nutrimentales

1) Retención de ácido ascórbico.

En la **Figura 13** se presentan los valores para el parámetro nutrimental de RAC de jugo de tomate obtenido mediante EM. Se observa que los valores se incrementan cuando la temperatura es baja (60°C). En cuanto al tiempo de exposición, la retención mostró su mayor porcentaje en la zona de 6 min. Por otro lado, a temperaturas altas y tiempos prolongados se encontraron los menores porcentajes de retención. Los valores experimentales para dicha variable de respuesta se encontraron en intervalo de 70.7-86.3 %. A continuación se muestra el modelo de predicción.

$$\text{RAC} = 87.77 - 0.06 T + 11.12 t - 0.17 Tt$$

El modelo de predicción tuvo como términos significativos la temperatura, el tiempo y la interacción entre ellos. Además, no presentó falta de ajuste ($p=.1026$), tuvo un coeficiente de variación de 2.79%, y explicó el 89% de los datos experimentales.

El comportamiento de este compuesto termolábil, ha sido reportado por diversos autores (Marfil y col 2008; Adekunle y col 2010; Haile 2013; Ishiwu Charles y col 2014) que sugieren en sus investigaciones, que la temperatura, al igual que otros factores como el pH, presencia de oxígeno y daño físico afectan el contenido. Sin embargo, para el caso de microondas, los mayores valores de retención se obtuvieron al emplear menores temperaturas. Esto puede deberse a que, en primera instancia, el tratamiento térmico se realizó sobre frutos enteros, por lo que algunos factores como el daño físico y presencia de oxígeno se minimizaron inicialmente (Sarr y Tsai 2008). Además, Zheng y Lu (2011) reportó para espárragos una buena retención de este compuesto cuando se tiene un pretratamiento de microondas antes del escaldado tradicional.

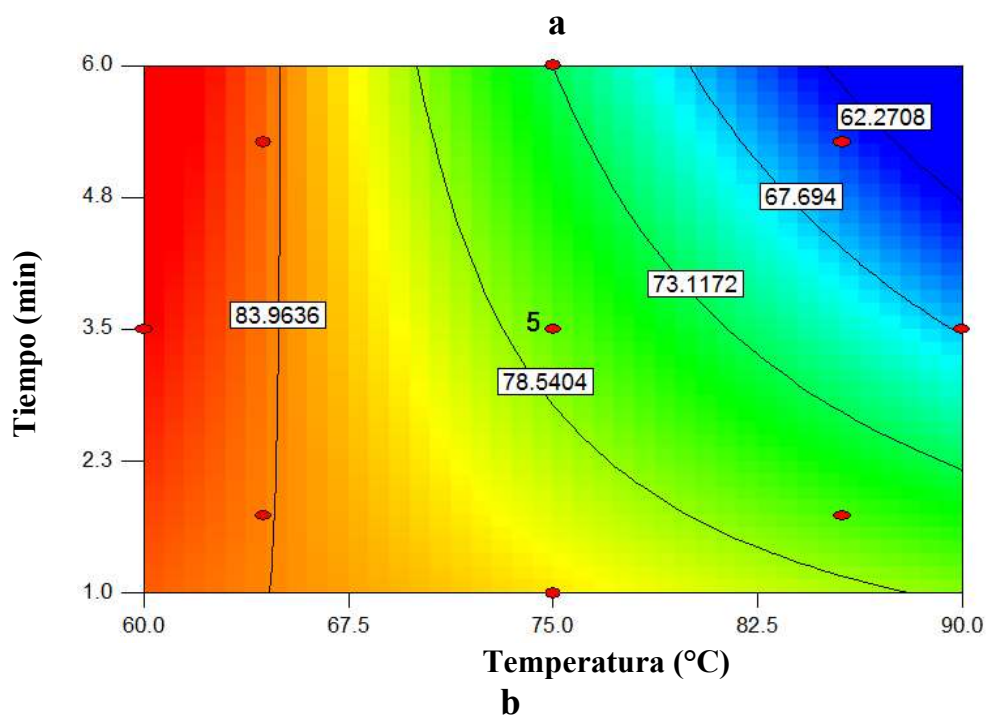
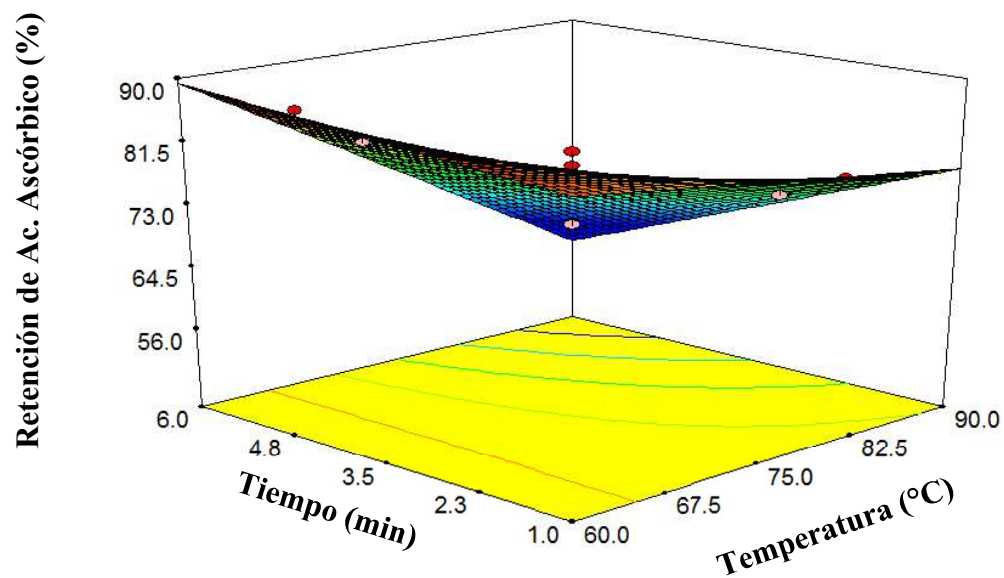


Figura 13. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de retención de ácido ascórbico en jugo de tomate obtenido mediante escaldado con microondas.

c Parámetros enzimáticos

1) Actividad remanente de poligalacturonasa.

La variable de respuesta PG1 se presenta en la **Figura 14**. Los valores se mantuvieron cercanos al 100% en temperaturas de 60 °C, conforme la temperatura se elevaba y los tiempos de exposición incrementaron, se muestra un decrecimiento, hasta alcanzar los valores menores de actividad remanente de PG1 (71.7 %). Todos los valores experimentales se situaron en el intervalo de 71.7-98.9%. El modelo de predicción obtenido fue el siguiente:

$$PG1 = -174.66 + 7.45 T + 16.72 t - 0.25 Tt - 0.05 T^2$$

El modelo de predicción presentó los términos de tiempo, temperatura, la interacción y el término cuadrático de temperatura fueron significativo. Además, no presentó falta de ajuste ($p=0.2355$), tuvo un coeficiente de variación de 2.97%, y explicó el 92% de los datos experimentales. Bajo estas condiciones se puede decir que el modelo fue adecuado y es repetible.

Fachin y col (2004) reporta que para PG1 purificada, un tratamiento térmico de 5 min a 90°C inactiva más del 90% de la actividad, valores muy superiores a los descritos en este trabajo. Sin embargo, la característica de este método es que el tratamiento térmico ocurre cuando la enzima se encuentra embebida en una matriz compleja dentro del fruto, instancia que puede explicar porque presenta una mayor resistencia (Houben y col 2013b).

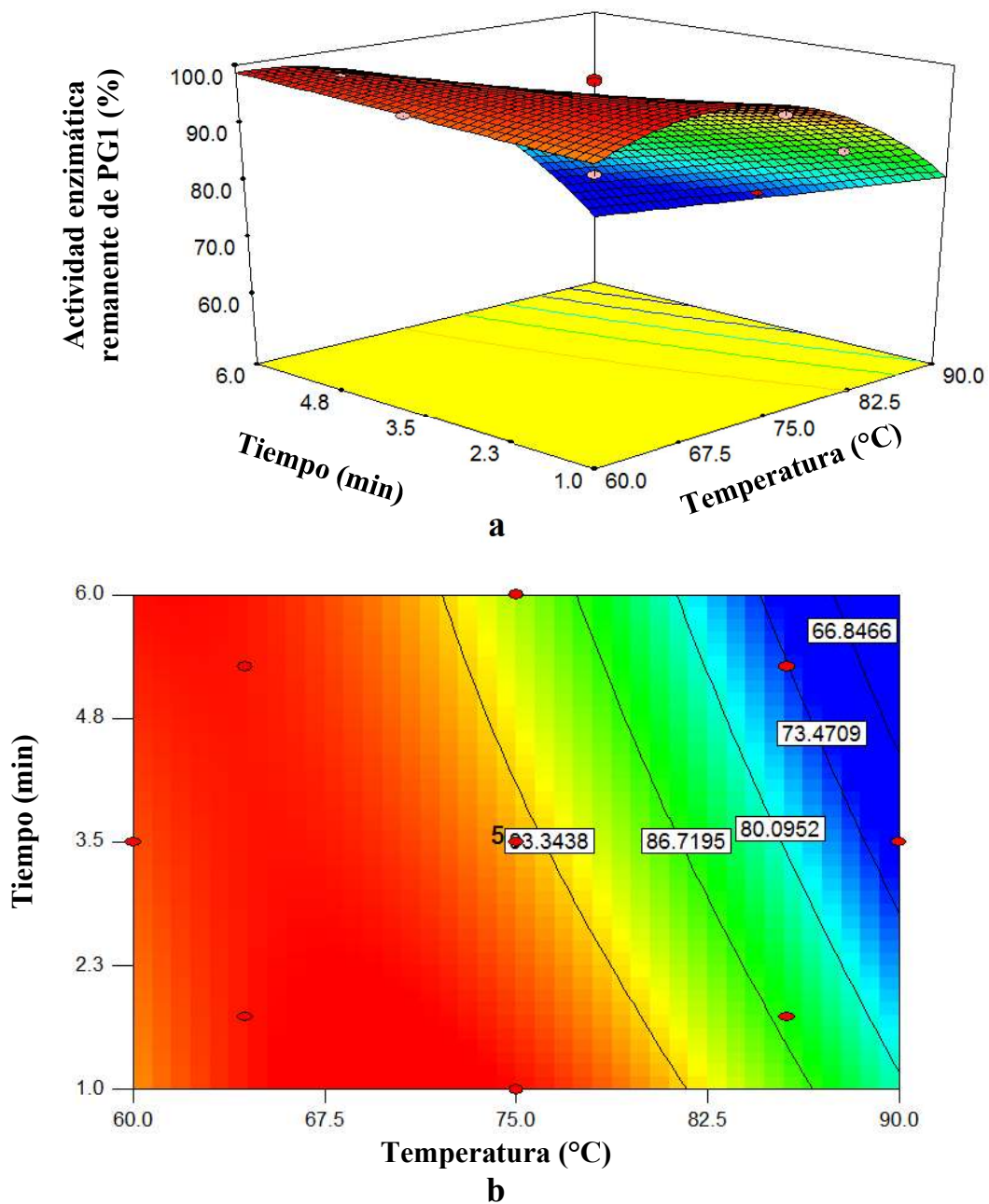


Figura 14. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la actividad remanente de PG1 en jugo de tomate obtenido mediante el escaldado con microondas.

3. Escaldado con microondas sin inmersión en agua.

a Parámetros fisicoquímicos

1) Diferencia total de color (ΔE)

La **Figura 15** muestra el comportamiento del ΔE , dependiente de la temperatura y tiempos de exposición de EMSI, de jugo de tomate. En la **Figura 15** se puede apreciar un incremento gradual en el ΔE cuando la temperatura se eleva, asimismo tiempos cortos (1 min) y 60 °C, presentan la menor diferencia en el color. Los valores experimentales se encontraron en un rango de 7.8 y 46.8. El modelo de predicción obtenido para esta variable de respuesta fue:

$$\Delta E = -56.79 + 0.65 T + 18.73 t - 1.87 t^2$$

Modelo que no presentó falta de ajuste ($p=0.1370$), con un coeficiente de variación de 7.37% y explicó el 90% de la variación total de los datos.

Diversos autores reportan que la coloración en tomate está dirigida por la presencia de carotenoides, en especial de licopeno. Este compuesto es de cadena abierta, cuyo cromóforo está formado por 11 enlaces conjugados, los cuales presentan una conformación espacial *trans* de manera natural. Sin embargo, el efecto de la temperatura radica en modificar dicha configuración e isomerizar a la forma *cis* (Hackett y col 2004; Khoo y col 2011; Jarquín-Enríquez y col 2013).

Un estudio de Brewer y col (1994), quien utilizó la tecnología de microondas y analizó el efecto sobre el color y otras características de frijoles, encontró que, este método mantenía mínimo daño a las características sensoriales si el tiempo de exposición era corto (menos de 5 min). Similar a lo reportado en este estudio, donde se encontraron mejores valores en tiempos de exposición cortos.

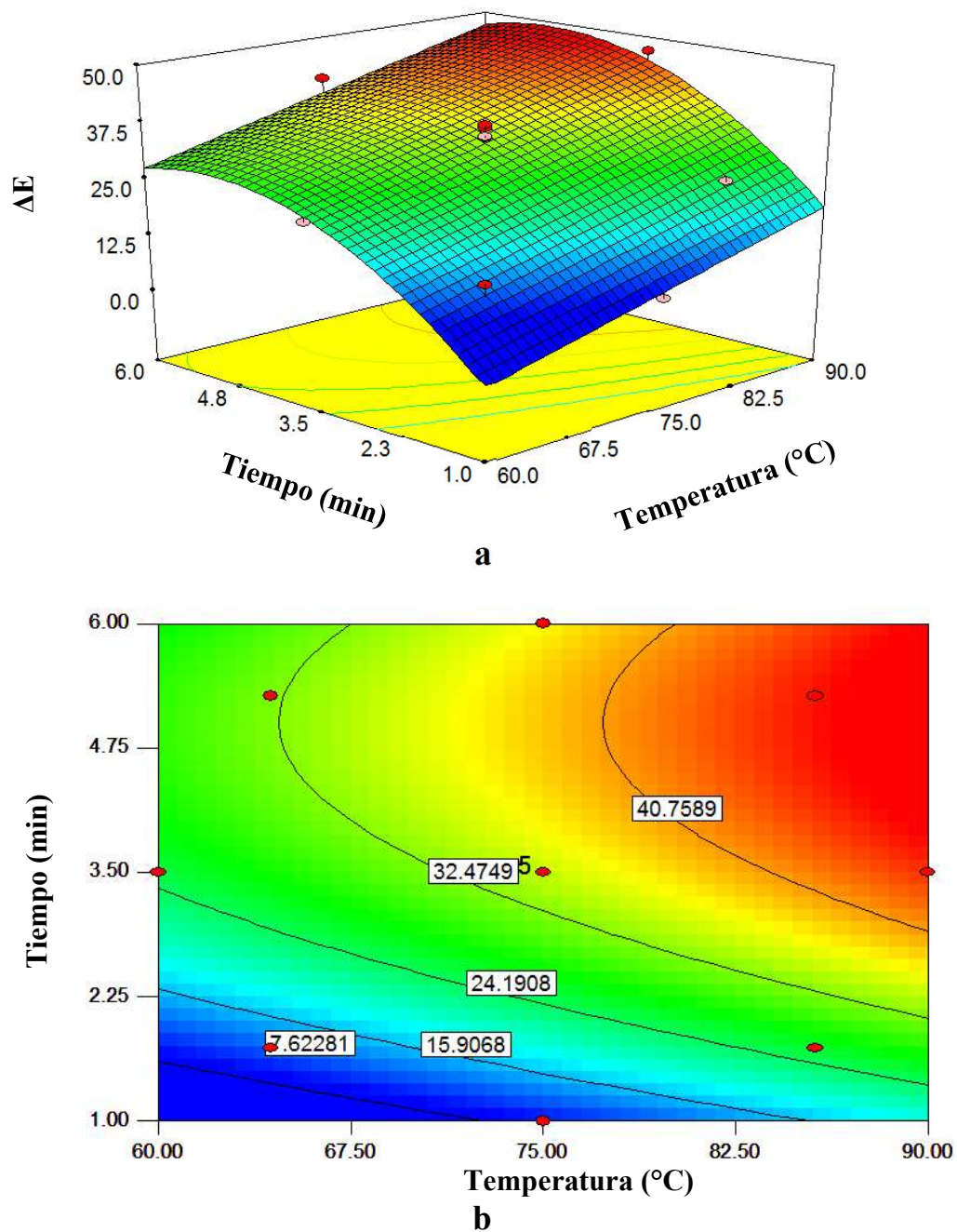


Figura 15. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el ΔE de jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.

Por otro lado, Heredia y col (2010) analizaron el efecto del calentamiento con microondas sobre el contenido, degradación e isomerización del licopeno en tomate cherry. Estos autores reportaron que una temperatura elevada de los tomates, proveniente de agua, o un incremento en la potencia de microondas, favorece la isomerización del carotenoide. Asimismo, Hernández y col (2008), presentó una conclusión similar al estudiar el efecto del microondas sobre puré de pimentón. En dichos trabajos se observó que la evolución de los parámetros de color se incrementa de manera progresiva conforme aumenta la intensidad y tiempo de exposición del alimento en el microondas.

2) Índice de consistencia (K)

Los valores experimentales para K de jugo obtenido por EMSI se muestran en la **Figura 16**. Para esta variable de respuesta los valores obtenidos estuvieron en el intervalo de 0.8-7.5 Pa·s⁻¹ para jugo de tomate obtenido con este método. El modelo de predicción fue de la siguiente forma ($p < 0.0001$):

$$K = 36.19 - 0.68 T - 1.23 t + 4.2 T^2$$

El cual no presentó falta de ajuste ($p = 0.2845$), además de tener un coeficiente de variación adecuado de 9.79%, y explicar el 88% de los datos experimentales.

Como se muestra en la **Figura 16**, una tendencia de valores altos se observa que el tiempo de escaldado tuvo un mayor efecto sobre la consistencia que la temperatura. Se ha reportado previamente que la consistencia está relacionada con la actividad enzimática de las enzimas pécticas, PME y PG. En este sentido, conforme la temperatura se eleva, se compromete su estabilidad y por lo tanto su función. Estas enzimas, cuando están activas, actúan sobre las pectinas y reducen significativamente la consistencia del jugo (Hsu 2008; Held y col 2015).

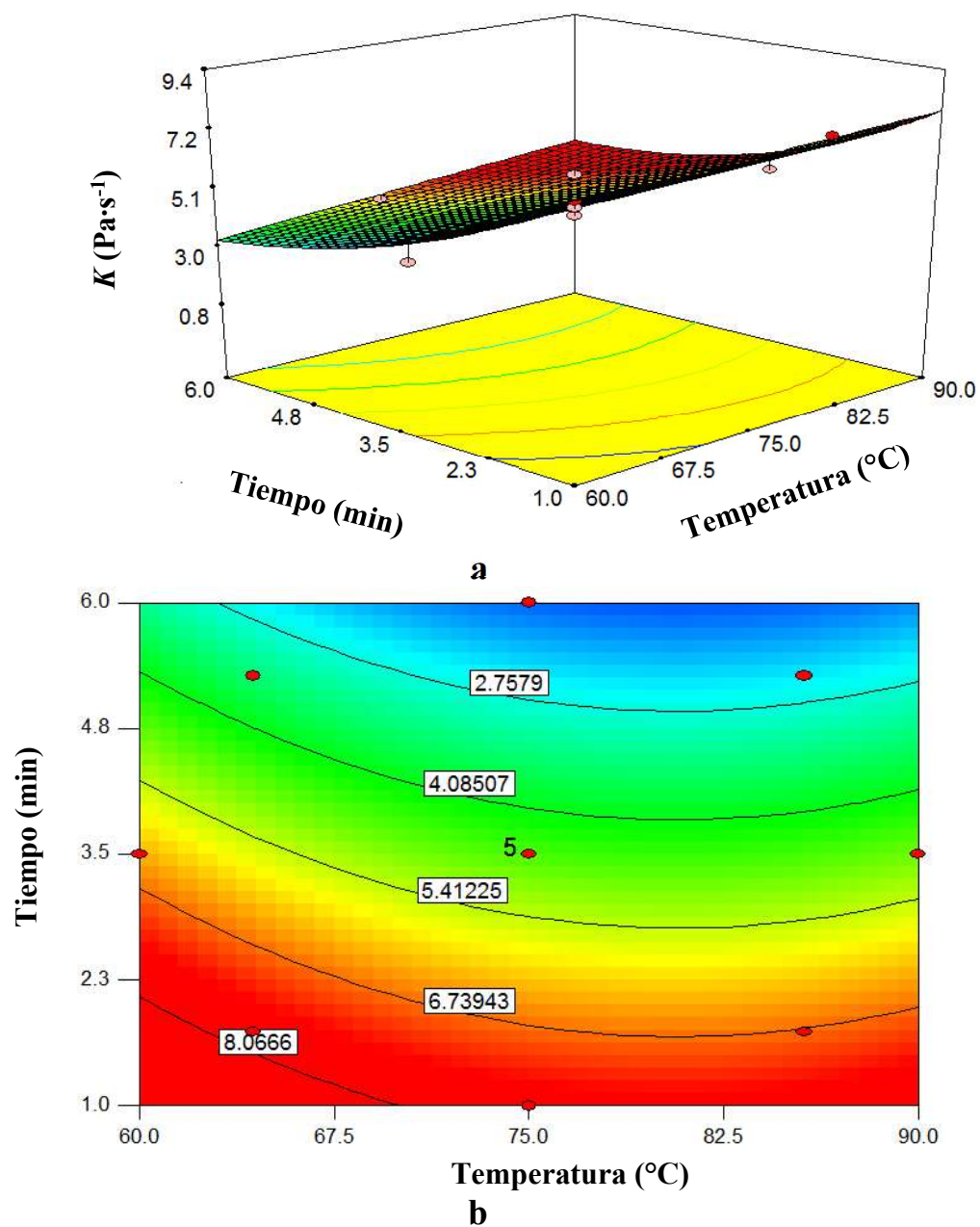


Figura 16. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre K de jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.

Es en este sentido y de manera indirecta, al inactivar las enzimas se obtienen productos con características diferentes. En los trabajos de Augusto y col (2011), también Augusto y col (2012) y Houben y col (2013a) se describe el comportamiento viscoelástico, propiedades reológicas y estabilidad de enzimas pécticas, respectivamente, de jugo de tomate. Los autores analizaron las propiedades de este alimento y las caracterizaron, concluyendo una clara dependencia a la temperatura de los parámetros reológicos, incluyendo la consistencia.

De manera similar Mirondo y Barringer (2015) realizaron mejoras al sabor y viscosidad en inactivación a baja y alta temperatura de jugo de tomate, en adición de la piel del fruto, que contiene pectinas. Concluyendo que la viscosidad se incrementa cuando se aplican temperaturas superiores a los 82 °C.

b Parámetros nutrimentales

1) Retención de Ác Ascórbico.

Los valores experimentales para la retención de Ác Ascórbico se encontraron en un intervalo del 79.4 % como valor menor, al 94.2%, de retención como valor mayor. En la **Figura 17** se puede observar el comportamiento de este parámetro nutrimental con respecto al tiempo y temperatura. A una temperatura de exposición mayor, el porcentaje de retención fue menor y viceversa. El modelo de predicción fue cuadrático, con significancia en todos los términos $p < 0.0001$:

$$RAC = 117.10 - 1.30 T + 20.47 t - 0.23 Tt + 0.02 T^2 - 0.47 t^2$$

El modelo pasó la prueba de falta de ajuste ($p=0.1537$), presentó un coeficiente de variación de 1.52% y pudo explicar hasta el 94% de los datos experimentales conseguidos. Resultados que hacen de este modelo adecuado y repetible.

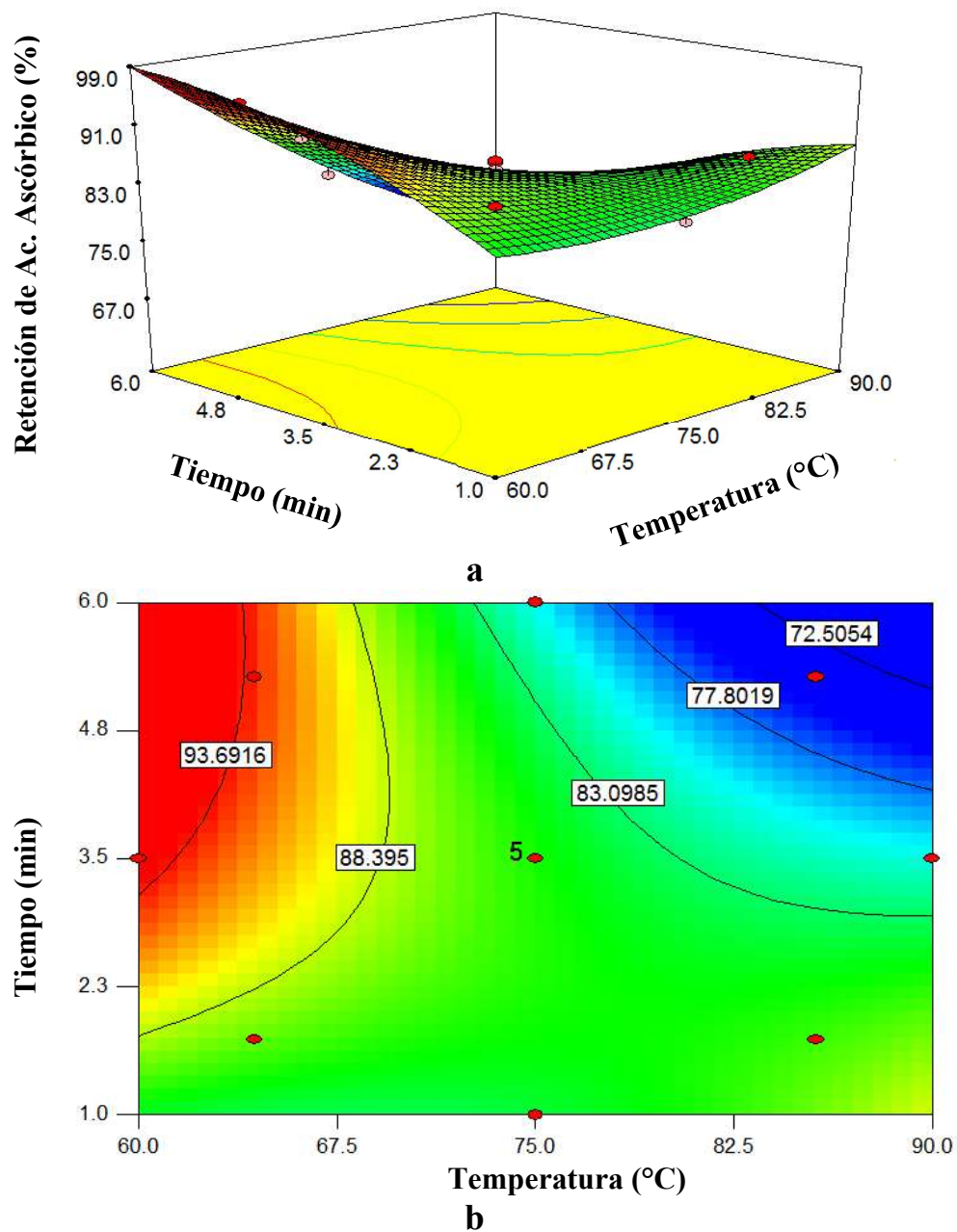


Figura 17. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la retención de ácido ascórbico de jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.

Estas tendencias pueden atribuirse a la sensibilidad de este compuesto a la temperatura, como lo reporta Ekow y col (2013), en su trabajo sobre el efecto del microondas sobre la cinética de degradación del ácido ascórbico en rebanadas de tomate.

Este comportamiento también ha sido descrito por Ozkan y col (2007) en espinaca procesada a través de microondas. En la investigación, ocurre una reducción en el contenido de este nutrimento conforme se eleva la potencia del microondas, las condiciones térmicas del proceso se elevan.

c Parámetros enzimáticos

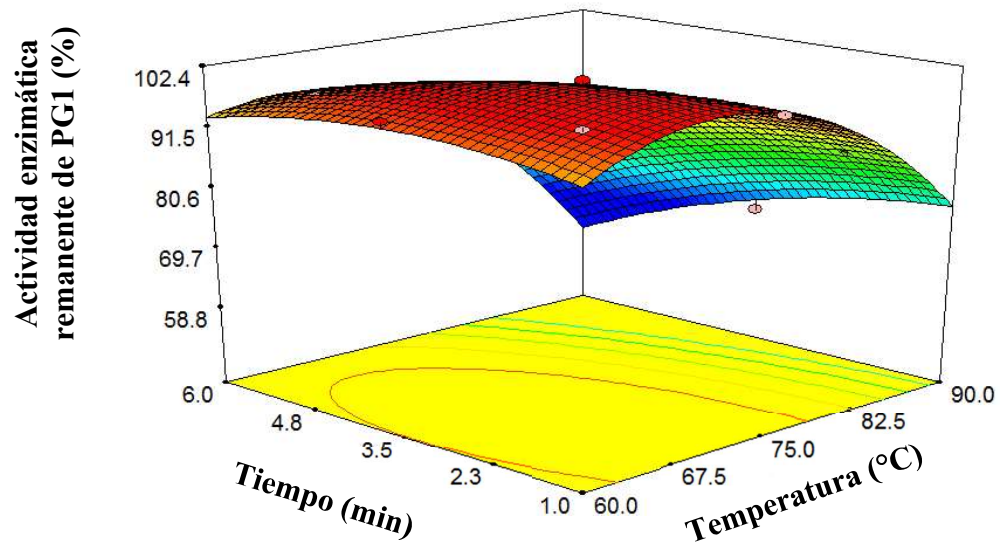
1) Actividad remanente de poligalacturonasa.

Los resultados de la actividad remanente de poligalacturonasa (PG1) están expresados en la **Figura 18**, donde se puede apreciar su comportamiento. Los valores estuvieron en el intervalo de 69.7 al 99.9 % de remanencia, en su actividad. El modelo de predicción fue cuadrático, con todos los términos significativos y un valor $p < 0.0001$.

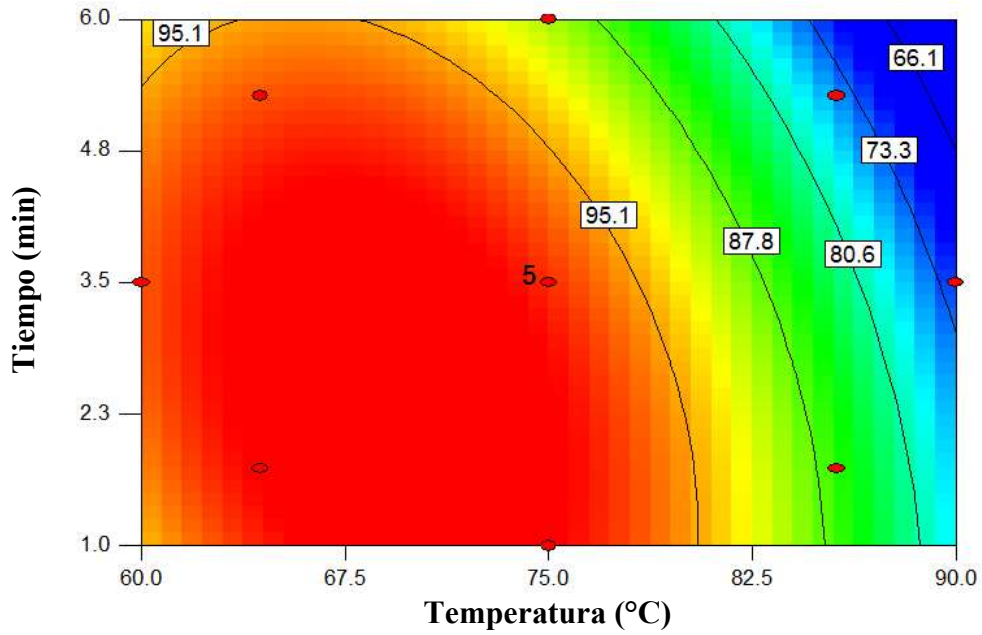
$$\text{Actividad remanente de PG1} = -216.56 + 8.87 T + 10.51 t - 0.11 Tt - 0.06 T^2 - 0.56 t^2$$

Mismo modelo que presentó un coeficiente de variación menor al 10% (1.58), no presentó falta de ajuste ($p=0.1295$), además de poder explicar el 92% de los datos experimentales, con lo que el modelo se consideró adecuado y repetible.

Se destaca que la fracción PG1 de la poligalacturonasa tiene una resistencia térmica muy elevada, como lo apuntan diferentes autores (Lopez y col 1997; Fachin y col 2002). Los parámetros cinéticos de tiempo de reducción decimal (D) y z, están en el orden de 16 min y 7.7 °C, a una temperatura de referencia de 90 °C. Lo que significa que, para inactivar el 90% de la actividad de esta isoenzima, es necesario elevar y mantener las muestras por 16 min a 90°C (Anthon y col 2002).



a



b

Figura 18. Gráficas de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la actividad remanente de PG1 de jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión.

En esta investigación, el mayor tiempo de exposición fue de 6 minutos, y a través del diseño experimental, las combinaciones más drásticas en cuanto a temperatura, se extendieron por un periodo de 3.5 min. Considerando esta estabilidad térmica, la predicción para actividad no se asemeja a distintos reportes de la literatura (Shook y col 2001; Verlent y col 2005), esto principalmente porque no se hace una distinción entre las fracciones isoenzimáticas y los resultados se expresan en combinación con ambas partes (PG1 y PG2).

B MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO.

1. Optimización de los procesos de escaldado.

En orden de obtener las mejores condiciones de procesamiento, cada una de las variables de respuestas recibió un valor subjetivo deseable en el producto terminado, esto incluye una menor ΔE y actividad remanente de PG1, asimismo, se consideró un mayor valor de K y retención de ácido ascórbico.

a Escaldado tradicional.

Para la optimización del escaldado tradicional, los valores de deseabilidad individual de cada una de las variables de respuesta se presentan en la **Figura 19**. El valor de deseabilidad global fue de 0.701, el cual acorde con Carrera (1998), proporciona un producto aceptable dentro de la escala subjetiva reportada. Las condiciones de procesamiento óptimas de temperatura y tiempo para el escaldado tradicional de jugo de tomate fueron 60°C y 1 min.

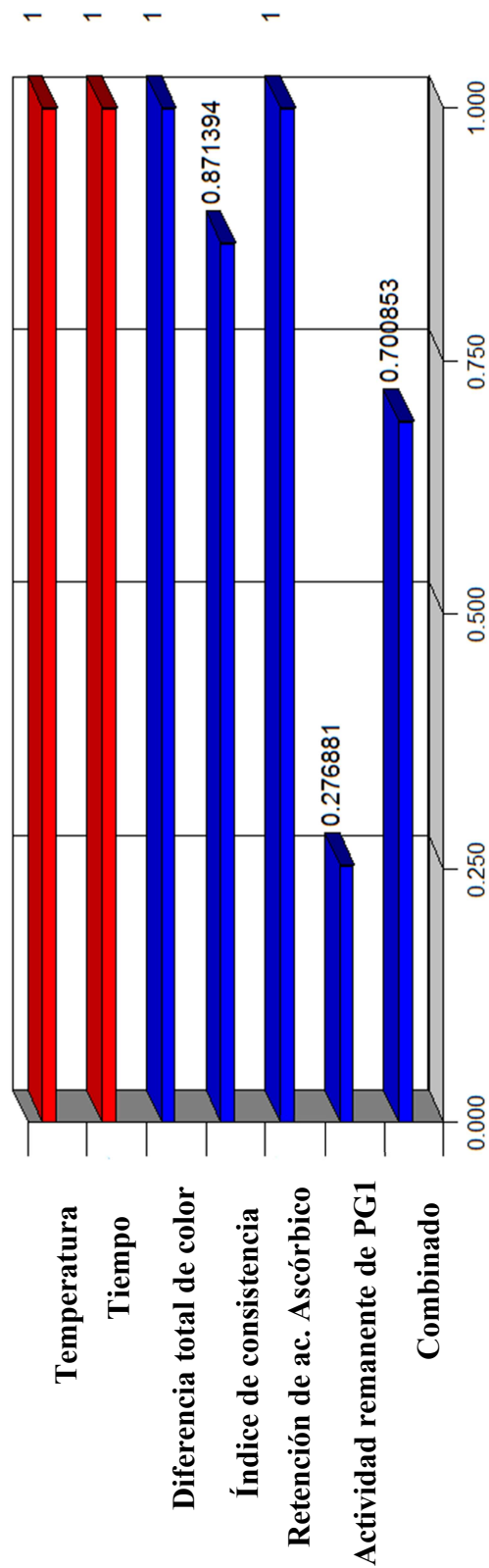


Figura 19. Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de tomate por el método tradicional.

b Escaldado con microondas.

La función de deseabilidad, calculada en base en los valores experimentales de cada una de las variables de respuesta se representa en la **Figura 20**. La combinación de variables de proceso, asociadas con la máxima respuesta de deseabilidad global, fue 90°C y 1.1 min, para el tratamiento combinado (microondas + baño María). El valor de deseabilidad global fue de 0.638, el cual se considera bueno y aceptable dentro de la escala subjetiva reportada por (Carrera 1998)

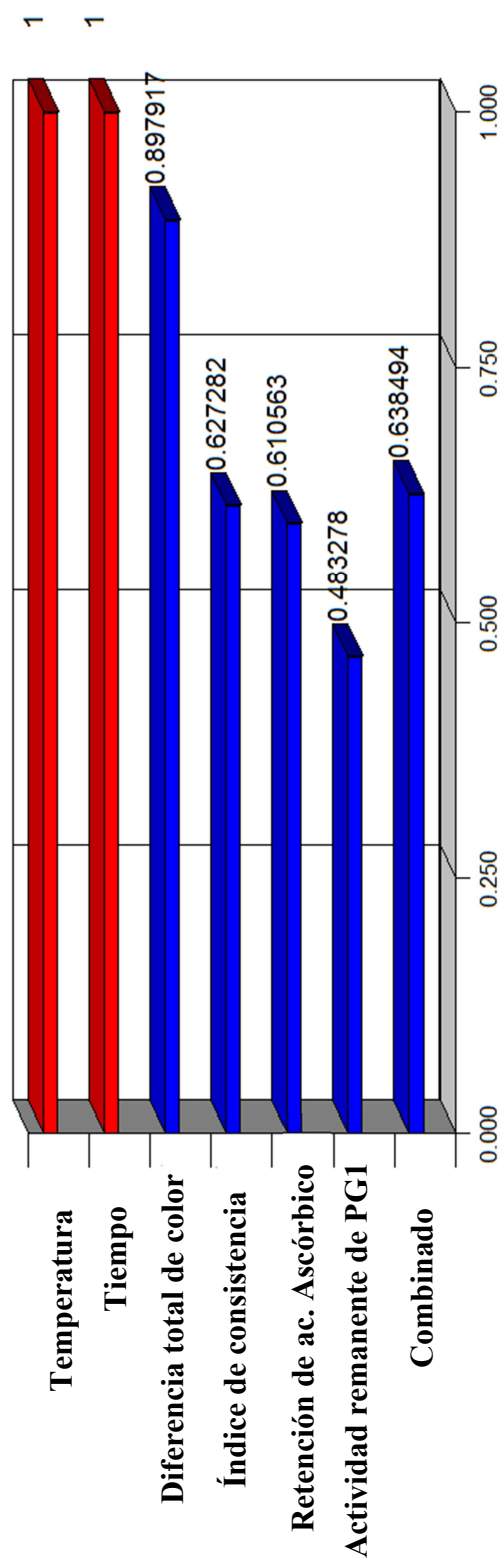


Figura 20. Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de tomate con microondas.

C Escaldado con microondas sin inmersión.

En la **Figura 21** se muestran los resultados de deseabilidad individual de cada una de las cuatro variables de respuesta. A través del programa Desing-Expert 7.0, se asociaron las variables con la combinación de tiempo y temperatura que maximiza las consideraciones descritas anteriormente. La temperatura óptima fue de 90 °C, mientras que el tiempo fue de 1 min.

El valor de deseabilidad global fue de 0.779. Carrera (1998) reporta una escala subjetiva para deseabilidad global que indica que valores cercanos a 0.8 son aceptables. Similarmente, diversos autores (Erbay y Icier 2009; Alam y col 2010; Schoeninger y col 2014) consideran que, debido a que los alimentos son estructuras complejas, una deseabilidad entre 0.6 y 0.8, es aceptable.

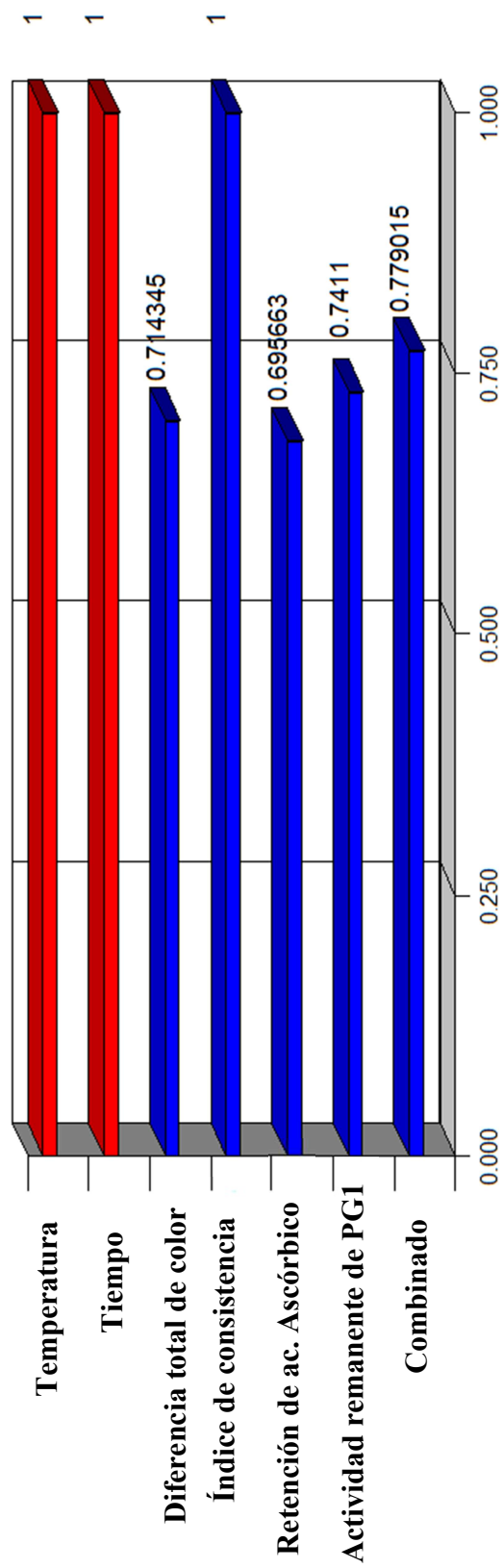


Figura 21. Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de tomate con microondas sin inmersión.

2. Validación de los modelos de predicción.

a Escaldado tradicional.

Para el escaldado tradicional, se presentan los datos experimentales de validación en el **Cuadro 6**. Se puede observar que los valores para cada variable de respuesta se encontraron dentro del intervalo predicho por el modelo. Por lo que se considera un modelo adecuado y repetible para las condiciones descritas en este proyecto.

Cuadro 6. Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta evaluadas en jugo de tomate escaldado con tratamiento tradicional.

Variable	Valor experimental	Valores predichos		
		Exacto	Mínimo	Máximo
ΔE	2.50 ± 0.68	1.23	-1.53	3.99
$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^{-1})$	0.39 ± 0.01	0.41	0.37	0.45
Retención de ac ascórbico (%)	86.9 ± 0.08	85.9	82.4	89.5
Actividad remanente de PG1 (%)	97.1 ± 0.33	85.2	92.8	97.6
Actividad remanente de PG2 (%)				90.5 ± 2.01

b Escaldado con microondas.

En el EM los valores de predicción del modelo matemático están representados en el **Cuadro 7**, asimismo los resultados experimentales de las variables de respuesta de jugo de tomates obtenidos mediante este tratamiento.

Se puede observar que los valores para cada variable de respuesta se encontraron dentro del intervalo predicho por el modelo. Por lo que se considera un modelo adecuado y repetible.

Cuadro 7. Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta evaluadas en jugo de tomates escaldados con microondas.

Variable	Valor experimental	Valores predichos		
		Exacto	Mínimo	Máximo
ΔE	14.6 ± 2.14	11.1	4.33	17.7
$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^{-1})$	0.31 ± 0.02	0.30	0.28	0.34
Retención de ac ascórbico (%)	81.9 ± 0.45	78.9	71.97	84.23
Actividad remanente de PG1 (%)	85.1 ± 2.97	80.8	74.70	86.99
Actividad remanente de PG2 (%)				70.7 ± 4.31

c Escaldado con microondas sin inmersión.

Un modelo matemático adecuado permite predecir los valores de las variables de respuesta de manera teórica en las diferentes combinaciones de tiempo y temperatura deseadas, es decir, si el proceso se realiza se estima un intervalo de valores en el cual, con un grado de confianza, se encuentra el valor experimental.

Para la validación del modelo matemático, se presentan los valores predichos y experimentales para el EMSI en el **Cuadro 8**. Todos los valores estuvieron dentro de los intervalos predichos por el modelo, por lo que se considera un modelo de predicción adecuado.

Cuadro 8. Valores predichos y experimentales de las variables de respuesta evaluadas en jugo de tomates escaldados con microondas sin inmersión.

Variable	Valor experimental	Valores predichos		
		Exacto	Mínimo	Máximo
ΔE	18.07 ± 4.54	18.97	14.16	23.79
$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^{-1})$	6.97 ± 0.45	8.15	6.48	9.83
Retención de ac ascórbico (%)	85.04 ± 0.14	88.58	84.05	93.12
Actividad remanente de PG1 (%)	82.09 ± 0.84	77.5	72.35	82.66
Actividad remanente de PG2 (%)		57.11 ± 0.85		

C CONTRASTE DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTIVOS DE JUGO DE TOMATE OBTENIDO CON LAS MEJORES CONDICIONES DE ESCALDADO TRADICIONAL, ESCALDADO CON MICROONDAS Y ESCALDADO CON MICROONDAS SIN INMERSIÓN.

1 Parámetros físicoquímicos.

a Diferencia total de color (ΔE)

Se puede observar en el **Cuadro 9** los valores experimentales del parámetro físicoquímicos ΔE de jugo de tomate obtenido bajo las mejores condiciones de procesamiento de los tres métodos de escaldado. El criterio de conservación de color fue conseguir valores mínimos de ΔE . En este sentido, ET presentó un menor valor con 1.97 ± 0.66 , en comparación con los métodos de EM (10.61 ± 3.69), y EMSI (18.32 ± 2.36), respectivamente. Los tres resultados mostraron diferencia estadística significativa entre ellos (Fisher, $p \leq 0.05$). La razón de estos valores puede deberse a las condiciones impuestas por cada técnica, en ET 60°C y 1 min fue la condición ideal, las cuales corresponden a un tratamiento de inactivación en frío (*cold break*). Mientras que las condiciones para los otros métodos, EM y EMSI, fueron 90°C y 1 min.

Urbonaviciene y col (2012) en su trabajo sobre tomates escaldados, concluye que el contenido de licopeno, que da la coloración característica al tomate, se ve afectado por la exposición prolongada a temperaturas altas. El licopeno se isomeriza y pasa de su conformación *trans*, a su contraparte *cis*. En este sentido, los resultados presentan una tendencia similar a la reportada también por otros investigadores (Matallana y col 2002; Hackett y col 2004).

El cambio de color, por la naturaleza del método de medición, combina en una ecuación los parámetros de L, a y b, porque los resultados se expresan como un valor absoluto. Un escaldado breve (0.5 min) eleva la luminosidad (L), mientras que cuando se prolonga este parámetro disminuye. Hernández y col (2008), en su trabajo sobre el modelamiento cinético para el cambio de color en pimentón, concluye que el tratamiento con microondas, sobre esta hortaliza afecta proporcionalmente al tiempo de exposición, en ese sentido, periodos breves tienen un impacto menor en el cambio de color.

Ozkan y col (2007), utilizando la tecnología del microondas, observó que tratamientos térmicos convencionales tuvieron igual o mayor diferencia en el color de espinacas escaldadas. Otro autor, Benlloch-Tinoco y col (2015), trabajó en la calidad sensorial de puré de kiwi durante el periodo de conservación, donde observó que en los primeros días de almacenamiento no hubo diferencia significativa entre el tratamiento convencional y el de microondas, sin embargo, con la prolongación del almacenamiento, los productos expuestos al microondas mostraron tener valores más deseables en sus características sensoriales, entre ellas, el color.

Cuadro 9. Valores experimentales de diferencia total de color de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escalado tradicional, escalado con microondas y escalado con microondas sin inmersión.

Método	ΔE
Escaldado tradicional	1.97 ± 0.66^a
Escaldado con microondas	10.61 ± 3.69^b
Escaldado con microondas sin inmersión	18.32 ± 2.36^c

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

b Índice de consistencia (K)

Los valores para este parámetro reológico se encuentran en el **Cuadro 10**. ET y EM presentaron valores similares (0.63 ± 0.07 y $0.37 \pm 0.07 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$), los cuales no mostraron tener diferencia significativa entre ellos (LSD; $p=0.05$). Sin embargo, EMSI presentó un valor tres veces más elevado ($2.45 \pm 0.54 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$). La consistencia está relacionada con el contenido de pectinas en el jugo de tomate. En la literatura se proponen diferentes explicaciones para la pérdida de consistencia de un producto: hidrólisis química de las pectinas por temperaturas altas, deshidratación irreversible de polímeros por altos solutos durante la concentración, y el corte por cizalla de las partículas en el jugo que se bombean al sistema (Anthon y col 2008). Asimismo, la actividad de enzimas pécticas, tales como PME y PG, están involucradas. Estas enzimas están localizadas en los tejidos y cuando las condiciones lo permiten, hidrolizan los enlaces de la pectina, disminuyendo la consistencia como efecto (Mirondo y Barringer 2015).

Para el caso de ET, la temperatura óptima (60°C), es adecuada para que las enzimas pécticas actúen. Diferentes autores reportan este comportamiento, *cold break* (Anthon y Barrett 2012; Mirondo y Barringer 2015), y la consistencia del jugo de tomate bajo estas condiciones es baja. En la literatura hay escasez de trabajos que reporten el índice de consistencia como tal, normalmente los reportes incluyen la viscosidad como parámetro (Kaur y col 2007; Koocheki y col 2009; Augusto y col 2012; Mirondo y Barringer 2015). Sin embargo, Tansakul y col (1992) reportó valores de índice de consistencia de $0.7\text{-}1.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ para el jugo de tomate recién extraído, similares a los presentados por ET y EM (0.37 y $0.63 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$), y mucho menor a lo reportado en EMSI ($2.45 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$).

Para el caso de EM y EMSI, la temperatura fue mayor (90°C), también reportada como *hot break*, aquí se inactivan las enzimas para que afecten el contenido de pectinas, y éstas a su vez elevan la consistencia del producto (Barringer 2004).

Cuadro 10. Valores experimentales de índice de consistencia de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escalado tradicional, escalado con microondas y escalado con microondas sin inmersión.

Método	$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^{-1})$
Escaldado tradicional	0.63 ± 0.07^a
Escaldado con microondas	0.37 ± 0.07^a
Escaldado con microondas sin inmersión	2.45 ± 0.54^b

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa

(Fisher, $p \leq 0.05$).

2 Parámetros nutrimentales

a Retención de ácido ascórbico.

El ácido ascórbico es un compuesto termolábil, dependiente de la temperatura. Sin embargo, también hay otros factores que afectan su degradación, tales como el pH, el oxígeno y la luz.

En el **cuadro 11** se muestra el porcentaje de retención de ácido ascórbico de los tres métodos. No se encontró diferencia estadística entre el ET ($87.13 \pm 0.99\%$) y EMSI ($88.93 \pm 1.93\%$), donde se resalta de manera importante la diferencia de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre las temperaturas óptimas de procesamiento. Por otro lado, EM presentó una retención del $82.04 \pm 1.20\%$.

Esto se puede explicar debido a las diferencias en los métodos de preparación de la muestra. En el caso de ET, la aplicación del tratamiento térmico fue después de obtener el jugo, instancia que expuso al ácido ascórbico en presencia del oxígeno, donde no influye la temperatura baja (60°C). Para el EM y EMSI, el fruto de tomate recibió el tratamiento térmico antes de la molienda, en consecuencia, la presencia de oxígeno durante el calentamiento estuvo restringida al nivel de aire ocluido en las muestras. Sin embargo, la diferencia entre ambos tratamientos térmicos puede explicar los porcentajes. Para EM, el fruto estuvo sumergido en agua, donde pudo existir una lixiviación de este compuesto soluble.

Razones adicionales por la cuáles esto pueda estar sucediendo ha sido descrita por diversos autores (Sablani y col 2006; Sarr y Tsai 2008). En tomates, el pH mantiene estable este compuesto en los tejidos, donde es relativamente ácido. La pérdida de ácido ascórbico también está ligada a la degradación química, que involucra el cambio de este compuesto a la forma de ácido dehidroascórbico. También, algunas enzimas oxidativas se liberan durante el daño ejercido en la trituración y obtención del jugo. Un ejemplo es la peroxidasa, común en frutas, que pueden catalizar la reacción de oxidación de compuesto antioxidantes como el ácido

ascórbico y fenoles. En este sentido, si la temperatura se eleva, puede inactivar dichas funciones lo que conlleva a un mayor contenido del compuesto de interés. Sin embargo, al mismo tiempo ocurre una degradación del mismo.

Este comportamiento también ha sido reportado por Huang y col (2007), quien utilizó la tecnología de microondas en hojas de té. Los valores en el contenido de ácido ascórbico, después de un tratamiento de microondas, fueron significativos y superiores, comparándose a una muestra de hoja de té sometida a escaldado tradicional (baño María).

Cuadro 11. Valores experimentales de índice de consistencia de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escalado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión.

Método	Retención de ac ascórbico (%)
Escaldado tradicional	87.13 ± 0.99^a
Escaldado con microondas	82.04 ± 1.20^b
Escaldado con microondas sin inmersión	88.93 ± 1.93^a

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa

(Fisher, $p \leq 0.05$)

3 Parámetros enzimáticos

a Actividad remanente de PG1

Los valores para la actividad remanente de poligalacturonasa PG1 de los tres métodos de escaldado se pueden observar en el **cuadro 12**.

El tratamiento ET presentó una remanencia muy elevada de la actividad (96%), mientras que EM y EMSI mostraron ser más efectivos al inactivar la isoenzima PG1, resultando en valores de 83.8 y 80.8 %, respectivamente, sin tener diferencia significativa entre ellos (LSD, $p=0.05$). Los valores de actividad remanente de PG1 para EM y EMSI fueron menores a lo reportado por Crelier y col (2001), quien, con escaldado tradicional, inactivó esta fracción en jugo de tomate y creó un modelo de predicción para su inactivación. Al extrapolar la tendencia del modelo, se pudo estimar que para las condiciones presentadas en este trabajo (90°C y 1 min) la actividad residual de la enzima estaba entre 85-90%, y se requería de un tiempo de 25 min para la inactivación total de la enzima. Duvetter y col (2009), por otro lado, encontró que para PG1, un escaldado tradicional a 65°C por 5 minutos, inactivaba de 5-15 % de esta fracción (remanencia 85-95%), valores similares de alta remanencia de esta actividad en ET. Estos resultados concuerdan en la alta estabilidad térmica de esta isoenzima. Diversos autores (Ortega y col 2004a; Rodrigo y col 2006), estiman que se necesitan temperaturas iguales o mayores a 90°C para lograr una inactivación significativa.

Lopez y col (1997), asimismo Anthon y col (2002), reportan parámetros cinéticos de inactivación para PG1, con valores de D superiores a 15 min a la temperatura de referencia de 90°C, esto significa que bajo éstas condiciones, PG1 se inactivará al 90%, por tanto menores tiempos de exposición predicen una remanencia más alta de la isoenzima.

Cuadro 12. Valores experimentales de actividad enzimática de poligalacturonasa (PG1) de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión.

Método	Actividad remanente PG1 (%)
Escaldado tradicional	96.21 ± 2.14 ^a
Escaldado con microondas	83.48 ± 1.86 ^b
Escaldado con microondas sin inmersión	80.89 ± 1.09 ^b

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa (Fisher, $p \leq 0.05$)

b Actividad remanente de PG2.

En el caso de PG2, en el **cuadro 13** se puede observar los valores de remanencia de esta isoenzima. Todos los valores experimentales fueron diferentes, estadísticamente, entre sí (LSD $p=0.05$). ET presentó una remanencia del 89%, mientras que EM y EMSI 68 y 61 %, respectivamente. PG2 ha sido reportada por diversos autores (Fachin y col 2002; Fachin y col 2004; Verlent y col 2004). Y se considera termolábil, por lo que la tendencia de los resultados concuerda con la estabilidad ante la temperatura.

Los valores de inactivación para los métodos empleando microondas fueron menores a los esperados. Una explicación puede ser que el tratamiento térmico se llevó a cabo en tomates enteros, encontrándose la enzima en su matriz natural, además de la brevedad de la exposición a la temperatura. En este sentido, Duvetter y col (2009) reporta una pérdida de actividad de PG2 de 50% después de 5 minutos a 58°C, valor que se puede comparar con el encontrado en esta investigación, donde, extrapolando resultados para ET (60 °C, 1 min), corresponde una pérdida de actividad de 11%.

Cuadro 13. Valores experimentales de actividad enzimática de poligalacturonasa (PG2) de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escalado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión.

Método	Actividad remanente PG2 (%)
Escaldado tradicional	89.53 ± 1.68^a
Escaldado con microondas	68.54 ± 5.33^b
Escaldado con microondas sin inmersión	61.95 ± 2.17^c

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa (Fisher, $p \leq 0.05$)

VIII CONCLUSIONES

Las mejores condiciones de tiempo y temperatura para obtener jugo de tomate escaldado por ET, con buenos parámetros fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos, fueron 1 min y 60 °C, asociadas a un tratamiento de inactivación enzimática en frío (*cold break*).

Las condiciones óptimas del método EM, en el cual se obtuvo jugo de tomate escaldado con los mejores atributos fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos fueron 1.1 min y 90 °C, típicas de un escaldado de inactivación en caliente (*hot break*).

Las condiciones óptimas para obtener jugo de tomate con buenos parámetros fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos por medio del EMSI fueron 1 min y 90°C, que corresponden a una operación de inactivación con alta temperatura (*hot break*).

En el contraste de parámetros fisicoquímicos de los métodos de escaldado, ET presentó mejores valores de color (1.97) sobre el EM (10.61) y EMSI (18.32). Por otro lado, cuando se compararon los valores del índice de consistencia se encontró que EMSI presentó valores más elevados (deseables) de $2.45 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras que para los otros métodos los resultados fueron 0.63 y $0.37 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ para ET y EM, respectivamente.

En la comparación de retención de ácido ascórbico, se encontró que tanto, ET y EMSI, presentaron valores similares (87.13 y 88.93 %, respectivamente). Mientras que en EM este valor fue inferior (82.04 %)

En cuanto a parámetros enzimáticos, EMSI y EM mostraron ser más eficaces, logrando valores de actividad remanente de poligalacturonasa mejores (80.89 y 83.48%, respectivamente) mientras que el ET inactivó en menor proporción, dejando la actividad remanente en 96.21%.

En el caso de la actividad de PG2, hubo diferencia significativa entre los tres métodos, siendo el EMSI quien presentó valores más deseables, seguido del EM y finalmente ET (61.95, 68.54 y 89.53 %), respectivamente.

A excepción del color, EMSI presentó los valores más deseables de los parámetros, instancia que lo coloca como el mejor de los tres métodos analizados en esta investigación. Se recomienda el EMSI para realizar la inactivación enzimática en caliente.

IX REREFENCIAS

- Adekunte A, Tiwari B, Cullen P, Scannell A, O'Donnell C. 2010. Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chemistry* 122(3):500-507.
- Aguilar CN, Reyes M, Garza H, Contreras J. 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(2):54-62.
- Ahmed J, Ramaswamy HS. 2004. Microwave pasteurization and sterilization of foods. *Food Science and Technology - New York - Marcel Dekker* 167:691.
- Alam MS, Amarjit S, Sawhney B. 2010. Response surface optimization of osmotic dehydration process for aonla slices. *Journal of food science and technology* 47(1):47-54.
- Amin I, Lee WY. 2005. Effect of different blanching times on antioxidant properties in selected cruciferous vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85:2314-2320.
- Amin I, Norazaidah Y, Hainida KE. 2006. Antioxidant activity and phenolic content of raw and blanched Amaranthus species. *Food Chemistry* 94(1):47-52.
- Anthon GE, Barrett DM. 2012. Pectin methylesterase activity and other factors affecting pH and titratable acidity in processing tomatoes. *Food Chemistry* 132(2):915-920.
- Anthon GE, Diaz JV, Barrett DM. 2008. Changes in pectins and product consistency during the concentration of tomato juice to paste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(16):7100-7105.
- Anthon GE, Sekine Y, Watanabe N, Barrett DM. 2002. Thermal inactivation of pectin methylesterase, polygalacturonase, and peroxidase in tomato juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(21):6153-6159.

- Augusto PE, Falguera V, Cristianini M,Ibarz A. 2011. Viscoelastic properties of tomato juice. *Procedia Food Science* 1:589-593.
- Augusto PE, Falguera V, Cristianini M,Ibarz A. 2012. Rheological behavior of tomato juice: steady-state shear and time-dependent modeling. *Food and Bioprocess Technology* 5(5):1715-1723.
- Avila-Gaxiola E, Delgado-Vargas F, Zazueta-Niebla J, López-Angulo G, Vega-García M,Caro-Corrales J. 2015. Variable Retort Temperature Profiles for Canned Papaya Puree. *Journal of Food Process Engineering* 39(1):11-18.
- Badui Dergal S. 2006. Química de los alimentos. Pearson Educación. 736 p.
- Barringer SA. 2004. Vegetables: tomato processing. Blackwell Publishing, Ltd.: Oxford, UK.
- Baş D,Boyacı İH. 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 78(3):836-845.
- Bayod E, Willers EP,Tornberg E. 2008. Rheological and structural characterization of tomato paste and its influence on the quality of ketchup. *LWT-Food Science and Technology* 41(7):1289-1300.
- Benlloch-Tinoco M, Igual M, Rodrigo D,Martínez-Navarrete N. 2015. Superiority of microwaves over conventional heating to preserve shelf-life and quality of kiwifruit puree. *Food Control* 50:620-629.
- Brewer MS, Klein BP, Rastogi BK,Perry AK. 1994. Microwave blanching effects on chemical, sensory and color characteristics of frozen green beans. *Journal of food quality* 17(3):245-259.
- Carrera GF. 1998. Diseño y análisis de experimentos industriales. Universidad Iberoamericana.

- Castro I, Macedo B, Teixeira J, Vicente A. 2004. The Effect of Electric Field on Important Food-processing Enzymes: Comparison of Inactivation Kinetics under Conventional and Ohmic Heating. *Journal of Food Science* 69(9):C696-C701.
- Crelier S, Robert M-C, Claude J, Juillerat M-A. 2001. Tomato (*Lycopersicon esculentum*) pectin methylesterase and polygalacturonase behaviors regarding heat-and pressure-induced inactivation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49(11):5566-5575.
- CROCETEX. 2015. ¿Cómo funciona el microondas? . Disponible en <http://www.crocetex.com>. Marzo de 2015.
- Chandrasekaran S, Ramanathan S, Basak T. 2013. Microwave food processing—A review. *Food Research International* 52(1):243-261.
- De Corcuera JIR, Cavalieri RP, Powers JR. 2004. Blanching of foods. *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering*. Marcel Dekker, Inc New York. p. 1-5.
- Derringer G, Suich R. 1980. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of quality technology* 12(4):214-219.
- Dolz Zaera P. 2008. Evaluación de la calidad de fruto en manzano: estudio de métodos no destructivos de análisis. Zaragoza, EUPLA.
- Domene M, Gázquez J, Segura M, Meca D. 2014. Evaluación de sustancias nutritivas y bioactivas en tres tipos de tomate: Asurcado (RAF), Cherry y Larga Vida. *Sociedad Española de Ciencias Hortícolas: Actas de Horticultura* 65(1):151-156.
- Dorantes-Alvarez L, Jaramillo-Flores E, González K, Martínez R, Parada L. 2011. Blanching peppers using microwaves. *Procedia Food Science* 1:178-183.
- Duvetter T, Sila D, Van Buggenhout S, Jolie R, Van Loey A, Hendrickx M. 2009. Pectins in processed fruit and vegetables: Part I—Stability and catalytic activity of pectinases. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 8(2):75-85.

- Ekow AE, Haile M, John O, Narku EF. 2013. Microwave-vacuum drying effect on drying kinetics, lycopene and ascorbic acid content of tomato slices. *Journal of Stored Products Research* 4(1):11-22.
- El-Raey MA, Ibrahim GE, Eldahshan OA. 2013. Lycopene and Lutein; A review for their Chemistry and Medicinal Uses. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 2(1).
- Elfresh F, Tekalign T, Solomon W. 2011. Processing quality of improved potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars as influenced by growing environment and blanching. *African Journal of Food Science* 5(6):324-332.
- Erbay Z, Icier F. 2009. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 91(4):533-541.
- Fachin D, Loey Av, VanLoeyIndrawati A, Ludikhuyze L, Hendrickx M. 2002. Thermal and High-Pressure Inactivation of Tomato Polygalacturonase: A Kinetic Study. *Journal of Food Science* 67(5):1610-1615.
- Fachin D, Smout C, Verlent I, Ly Nguyen B, Van Loey AM, Hendrickx ME. 2004. Inactivation kinetics of purified tomato polygalacturonase by thermal and high-pressure processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52(9):2697-2703.
- Fachin D, Van Loey AM, Ly Nguyen B, Verlent I, Indrawati, Hendrickx ME. 2003. Inactivation kinetics of polygalacturonase in tomato juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 4(2):135-142.
- FAOSTAT. 2016. Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en <http://faostat.fao.org> Marzo 2015.
- FEHD. 2005. Microwave cooking and food safety. Risk Assessment Studies N° 19. Food and Environmental Hygiene Department.
- Fennema O. 2000. Química de los alimentos. Acribia.

- Gonçalves E, Pinheiro J, Abreu M, Brandão T, Silva CL. 2007. Modelling the kinetics of peroxidase inactivation, colour and texture changes of pumpkin (*Cucurbita maxima* L.) during blanching. *Journal of Food Engineering* 81(4):693-701.
- Hackett M, Lee J, Francis D, Schwartz S. 2004. Thermal stability and isomerization of lycopene in tomato oleoresins from different varieties. *Journal of Food Science* 69(7):536-541.
- Haile M. 2013. Microwave-vacuum drying effect on drying kinetics, lycopene and ascorbic acid content of tomato slices. *Journal of Stored Products and Postharvest Research* 4(1):11-22.
- Held MT, Anthon GE, Barrett DM. 2015. The effects of bruising and temperature on enzyme activity and textural qualities of tomato juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95(8):1598-1604.
- Heredia A, Barrera C, Andrés A. 2007. Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. *Journal of Food Engineering* 80(1):111-118.
- Heredia A, Peinado I, Rosa E, Andrés A. 2010. Effect of osmotic pre-treatment and microwave heating on lycopene degradation and isomerization in cherry tomato. *Food Chemistry* 123(1):92-98.
- Hernández JA, Grosso S, Villalba MR, Arias NR. 2008. Modelamiento cinético para los cambios del color en paste de pimentón (*Capsicum annum*) durante el tratamiento con microondas.
- Houben K, Kermani ZJ, Van Buggenhout S, Jolie RP, Van Loey AM, Hendrickx ME. 2013a. Thermal and high-pressure stability of pectin-modifying enzymes in a tomato matrix: Towards the creation of specific endogenous enzyme populations through processing. *InsideFood Symposium* location: Leuven, Belgium date: 9-12 April 2013.

- Houben K, Kermani ZJ, Van Buggenhout S, Jolie RP, Van Loey AM, Hendrickx ME. 2013b. Thermal and high-pressure stability of pectinmethylesterase, polygalacturonase, β -galactosidase and α -arabinofuranosidase in a tomato matrix: towards the creation of specific endogenous enzyme populations through processing. *Food and Bioprocess Technology* 6(12):3368-3380.
- Hsu K-C. 2008. Evaluation of processing qualities of tomato juice induced by thermal and pressure processing. *LWT-Food Science and Technology* 41(3):450-459.
- Huang Y, Sheng J, Yang F, Hu Q. 2007. Effect of enzyme inactivation by microwave and oven heating on preservation quality of green tea. *Journal of Food Engineering* 78(2):687-692.
- Ishiwu Charles N, Iwouno JO, Obiegbuna James E, Ezike Tochukwu C. 2014. Effect of thermal processing on lycopene, beta-carotene and Vitamin C content of tomato [Var. UC82B]. *Journal of Food and Nutrition Sciences* 2(3):87-92.
- Jarquín-Enríquez L, Mercado-Silva E, Maldonado J, Lopez-Baltazar J. 2013. Lycopene content and color index of tomatoes are affected by the greenhouse cover. *Scientia Horticulturae* 155:43-48.
- Kaur C, George B, Deepa N, Jaggi S, Kapoor H. 2007. Viscosity and quality of tomato juice as affected by processing methods. *Journal of food quality* 30(6):864-877.
- Khoo H-E, Prasad KN, Kong K-W, Jiang Y, Ismail A. 2011. Carotenoids and their isomers: color pigments in fruits and vegetables. *Molecules* 16(2):1710-1738.
- Klopotek Y, Otto K, Böhm V. 2005. Processing strawberries to different products alters contents of vitamin C, total phenolics, total anthocyanins, and antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(14):5640-5646.

- Koochehi A, Ghandi A, Razavi S, Mortazavi SA, Vasiljevic T. 2009. The rheological properties of ketchup as a function of different hydrocolloids and temperature. *International journal of food science & technology* 44(3):596-602.
- Leoni C, Jongen W. 2002. Improving the nutritional quality of processed fruits and vegetables: the case of tomatoes. *Fruit and vegetable processing: improving quality*:52-66.
- López Camelo AF, Gómez PA. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Horticultura Brasileira* 22(3):534-537.
- Lopez P, Sanchez AC, Vercet A, Burgos J. 1997. Thermal resistance of tomato polygalacturonase and pectinmethylesterase at physiological pH. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A* 204(2):146-150.
- Marfil P, Santos E, Telis V. 2008. Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. *LWT-Food Science and Technology* 41(9):1642-1647.
- Martínez-Valverde I, Periago MJ, Provan G, Chesson A. 2002. Phenolic compounds, lycopene and antioxidant activity in commercial varieties of tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82(3):323-330.
- Matallana M, Sánchez-Mata M, Lillo Ayué R, Labra E, Cámara M. 2002. Lycopene and hydroxymethylfurfural (HMF) evaluation in tomato products. *VIII International Symposium on the Processing Tomato* 613. 365-371 p.
- Mikkelsen R. 2005. Tomato flavor and plant nutrition: a brief review. *Better Crops with Plant Food* 89(2):14-15.
- 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.
- Mirondo R, Barringer S. 2015. Improvement of flavor and viscosity in hot and cold break tomato juice and sauce by peel removal. *J Food Sci* 80(1):S171-179.
- Mitschka P. 1982. Simple conversion of Brookfield RVT readings into viscosity functions. *Rheologica Acta* 21(2):207-209.
- Monardes H. 2009. 2. Características botánicas. *MANUAL DE CULTIVO DE TOMATE (Lycopersicon esculentum* Mill.). p. 10.
- Montgomery DC, Jaime DS. 1991. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica.
- Moreno MA. 2001. Control PID. En: Andrés, UMdS, editor. La Paz, Bolivia.
- Myers R, Montgomery DC. 1971. *Response surface methods*. Allyn-Bacon: Boston, MA, USA.
- Nisha P, Singhal RS, Pandit AB. 2011. Kinetic modelling of colour degradation in tomato puree (*Lycopersicon esculentum* L.). *Food and Bioprocess Technology* 4(5):781-787.
- Nuez F. 1995. *El Cultivo del tomate*. Mundi-Prensa.
- Oboh G. 2005. Effect of blanching on the antioxidant properties of some tropical green leafy vegetables. *LWT - Food Science and Technology* 38(5):513-517.
- Odriozola-Serrano I, Aguiló-Aguayo I, Soliva-Fortuny R, Gimeno-Añó V, Martín-Belloso O. 2007. Lycopene, vitamin C, and antioxidant capacity of tomato juice as affected by high-intensity pulsed electric fields critical parameters. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55(22):9036-9042.
- Oliveira M, Franca A. 2002. Microwave heating of foodstuffs. *Journal of Food Engineering* 53(4):347-359.

- Ortega N, De Diego S, Perez-Mateos M, Busto M. 2004a. Kinetic properties and thermal behaviour of polygalacturonase used in fruit juice clarification. *Food Chemistry* 88(2):209-217.
- Ortega N, de Diego S, Perez-Mateos M, Busto MD. 2004b. Kinetic properties and thermal behaviour of polygalacturonase used in fruit juice clarification. *Food Chemistry* 88(2):209-217.
- Ozkan IA, Akbudak B, Akbudak N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering* 78(2):577-583.
- Peng J, Tang J, Jiao Y, Bohnet SG, Barrett DM. 2013. Dielectric properties of tomatoes assisting in the development of microwave pasteurization and sterilization processes. *LWT-Food Science and Technology* 54(2):367-376.
- Pert E, Carmel Y, Birnboim A, Olorunyolemi T, Gershon D, Calame J, Lloyd IK, Wilson OC. 2001. Temperature measurements during microwave processing: the significance of thermocouple effects. *Journal of the American Ceramic Society* 84(9):1981-1986.
- Ponne CT, Baysal T, Yuksel D. 1994. Blanching leafy vegetables with electromagnetic energy. *Journal of Food Science* 59(5):1037-1041.
- Ranjan S, Dasgupta N, Walia N, Thara Chand C, Ramalingam C. 2016. Microwave Blanching: An Emerging Trend in Food Engineering and its Effects on *Capsicum annuum* L. *Journal of Food Process Engineering*:1-8.
- Rodrigo D, Cortés C, Clynen E, Schoofs L, Loey AV, Hendrickx M. 2006. Thermal and high-pressure stability of purified polygalacturonase and pectinmethylesterase from four different tomato processing varieties. *Food Research International* 39(4):440-448.

- Rodrigo D, Van Loey A, Hendrickx M. 2007. Combined thermal and high pressure colour degradation of tomato puree and strawberry juice. *Journal of Food Engineering* 79(2):553-560.
- Rodríguez RR, Rodríguez JMT, Juan JAMS. 1997. Cultivo moderno del tomate. Mundi-Prensa.
- Ruiz-Ojeda LM, Peñas FJ. 2013. Comparison study of conventional hot-water and microwave blanching on quality of green beans. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 20:191-197.
- Sablani S, Opara L, Al-Balushi K. 2006. Influence of bruising and storage temperature on vitamin C content of tomato fruit. *Journal of Food Agriculture and Environment* 4(1):54.
- Sagar V, Kumar PS. 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology* 47(1):15-26.
- SAGARPA. 2010. Monografía del Jitomate. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en www.sagarpa.com.mx. Marzo de 2015.
- Salas JA, Sanabria ME, Pire R. 2001. Variación en el índice y densidad estomática en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) sometidas a tratamientos salinos. *Bioagro* 13(3):99-104.
- Sánchez-Hernández D, Devecé C, Catalá J, Rodríguez-López J, Tudela J, García-Cánovas F, de los Reyes E. 1999. Enzyme inactivation analyses for industrial blanching applications employing 2450 MHz monomode microwave cavities. *Journal of microwave power and electromagnetic energy* 34(4):239-252.
- Sánchez LEL, Lazo MRC, Gonzalo MRH, García MJ, Baños YS. 2000. Aspectos biológicos del cultivo de *Lycopersicon esculentum* Mill. (Tomate). *Oceanía* 1487(3):1553.
- Sarr F, Tsai PJ. 2008. Effects of acidification on PE activity, color and antioxidant properties of cold break tomato juice. *Journal of food quality* 31(1):34-47.

- Schirack AV, Drake MA, Sanders TH, Sandeep KP. 2006. Characterization of Aroma-Active Compounds in Microwave Blanched Peanuts. *Journal of Food Science* 71(9):C513-C520.
- Schoeninger V, Coelho SRM, Christ D, Sampaio SC. 2014. Processing parameter optimization for obtaining dry beans with reduced cooking time. *LWT-Food Science and Technology* 56(1):49-57.
- Severini C, Baiano A, Del Nobile M, Mocci G, De Pilli T. 2004. Effects of blanching on firmness of sliced potatoes. *Italian journal of food science* 16(1):31-44.
- Shaheen MS, El-Ghorab AH, Anjum FM, El-Massry KF. 2012. Microwave applications in thermal food processing. INTECH Open Access Publisher.
- Shook C, Shellhammer T, Schwartz S. 2001. Polygalacturonase, pectinesterase, and lipoxygenase activities in high-pressure-processed diced tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49(2):664-668.
- SIAP. 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en <http://www.siap.gob.mx/>. Marzo de 2016.
- Sosa-Morales. N-M. 2012. El jitomate (*Solanum lycopersicum*): aporte nutricional, enfermedades, postcosecha y tecnologías para su almacenamiento en fresco. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 6(1):40-53.
- SSP. 2015. Tomato Processing Plant. For Manufacturing Tomato Ketchup, Puree and Paste. Disponible en <http://www.sspindia.com>. Marzo de 2015.
- Stratakos AC, Delgado-Pando G, Linton M, Patterson MF, Koidis A. 2016. Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system. *Food Chemistry* 190:622-628.

- Şumnu G, Ndife MK, Bayindirli L. 2000. Optimization of microwave baking of model layer cakes. *European Food Research and Technology* 211(3):169-174.
- Tansakul A, Noomhorm A, Bhumiratana S, Patmayothin N. 1992. Effect of Pulper-Finisher Specifications on Tomato Juice Characteristics. *ASEAN Food Journal* 7:0.1.
- Thipyapong P, Melkonian J, Wolfe DW, Steffens JC. 2004. Suppression of polyphenol oxidases increases stress tolerance in tomato. *Plant Science* 167(4):693-703.
- Thongsook T, Barrett DM. 2005. Heat inactivation and reactivation of broccoli peroxidase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(8):3215-3222.
- Urbonaviciene D, Viskelis P, Viskelis J, Jankauskiene J, Bobinas C. 2012. Lycopene and β -carotene in non-blanching and blanching tomatoes. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 10(2):142-146.
- USDA. 2016. Color Classification Requirements in Tomatoes. Disponible en www.usda.gov. Julio 2016.
- Verlent I, Smout C, Duvetter T, Hendrickx M, Van Loey A. 2005. Effect of temperature and pressure on the activity of purified tomato polygalacturonase in the presence of pectins with different patterns of methyl esterification. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 6(3):293-303.
- Verlent I, Van Loey A, Smout C, Duvetter T, Hendrickx ME. 2004. Purified tomato polygalacturonase activity during thermal and high-pressure treatment. *Biotechnol Bioeng* 86(1):63-71.
- Vieira MC, Teixeira A, Silva C. 2000. Mathematical modeling of the thermal degradation kinetics of vitamin C in cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) nectar. *Journal of Food Engineering* 43(1):1-7.
- Vollmer M. 2004. Physics of the microwave oven. *Physics Education* 39(1):74.

- Workman D. 2016. Tomatoes Exports by Country. Disponible en www.worldstopexports.com. Septiembre 2016.
- 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.
- Zhang M, Tang J, Mujumdar A, Wang S. 2006. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 17(10):524-534.
- 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.
- Zhuosi L, Yudong C, Shixiong L. 2010. Quality kinetics of microwave and pasteurised processed tomato juice. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2010(7).

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados experimentales de parámetros físicos, nutrimentales y enzimáticos en el escaldado tradicional de tomate a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	ΔE	K (Pa·s⁻¹)	Retención de Ac. Ascórbico (%)	Actividad remanente de PG1 (%)
1.73	64.4	18.0	0.34	78.8	99.8
1.73	85.6	29.1	0.26	59.7	98.9
5.27	64.4	38.7	0.21	76.1	91.0
5.27	85.6	49.7	0.42	58.5	84.3
3.5	60.0	34.9	0.2	81.9	97.2
3.5	90.0	54.1	0.31	61.5	91.5
1.0	75.0	11.4	0.38	68.5	99
6.0	75.0	35.5	0.38	60.4	82.3
3.5	75.0.	45.8	0.3	66.2	99.5
3.5	75.0	43.4	0.32	65.7	99.3
3.5	75.0	44.6	0.32	63.1	98.7
3.5	75.0	46.4	0.3	63.4	98
3.5	75.0	44.8	0.3	66.6	99

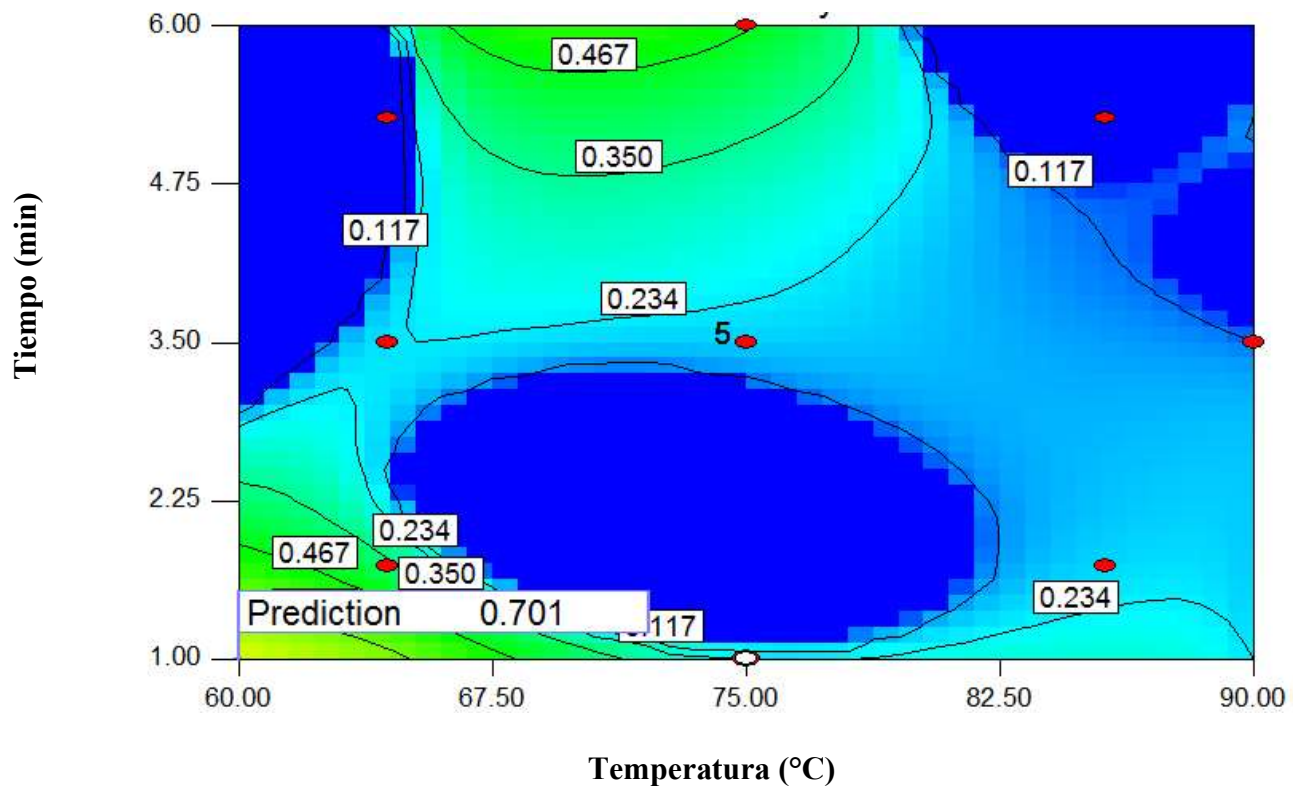
ANEXO 2. Resultados experimentales de parámetros físicos, nutrimentales y enzimáticos en el escaldado con microondas, de tomates, a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	ΔE	K (Pa·s⁻¹)	Retención de Ac. Ascórbico (%)	Actividad remanente de PG1 (%)
1.73	64.4	9.5	0.23	87.3	98.9
1.73	85.6	20.7	0.32	76.8	85.2
5.27	64.4	18.3	0.21	85.8	97.9
5.27	85.6	69.5	0.37	62.5	65.2
3.5	60.0	6.3	0.21	86.3	96.9
3.5	90.0	56.4	0.36	70.7	71.7
1.0	75.0	6.7	0.25	79.8	97.1
6.0	75.0	52.8	0.29	74.1	89.7
3.5	75.0.	25.7	0.26	75.2	93.2
3.5	75.0	28.4	0.27	76.8	92.3
3.5	75.0	29.6	0.29	75.5	94.5
3.5	75.0	26.1	0.26	75.7	97.7
3.5	75.0	28.5	0.28	78.5	97.1

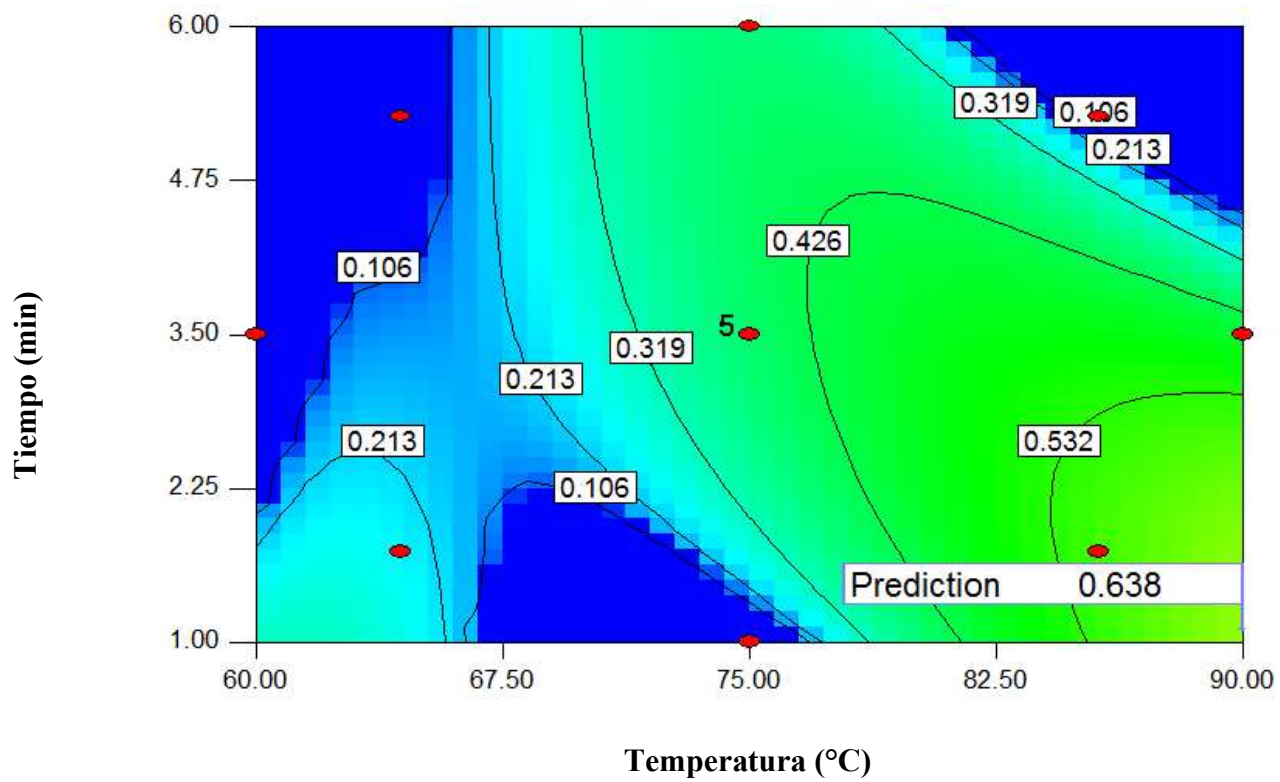
ANEXO 3. Resultados experimentales de parámetros físicos, nutrimentales y enzimáticos en el escaldado con microondas sin inmersión, de tomates, a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	ΔE	K (Pa·s⁻¹)	Retención de Ac. Ascórbico (%)	Actividad remanente de PG1 (%)
1.73	64.4	14.9	7.5	87.6	99.8
1.73	85.6	24.7	7.0	86.8	87.9
5.27	64.4	29.7	4.0	94.2	97.0
5.27	85.6	43.5	2.1	75.7	76.5
3.5	60.0	24.2	6.1	93.9	98.7
3.5	90.0	46.8	4.9	79.7	69.7
1.0	75.0	7.8	7.2	83.3	99.8
6.0	75.0	40.6	0.8	79.4	89.6
3.5	75.0.	36.4	4.7	84.9	98.8
3.5	75.0	33.4	5.4	84.0	97.9
3.5	75.0	34.3	4.4	86.0	99.3
3.5	75.0	37.1	4.7	85.1	97.3
3.5	75.0	34.5	5.4	86.4	99.9

ANEXO 4. Gráfica de contorno de deseabilidad global para optimización del escaldado tradicional.



ANEXO 5. Gráfica de contorno de deseabilidad global para optimización del escaldado con microondas.



ANEXO 6. Gráfica de contorno de deseabilidad global para optimización del escaldado con microondas sin inmersión.

