



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL**

**ESTABILIDAD MICROBIOLÓGICA, SENSORIAL Y
NUTRACÉUTICA DE JUGO DE PITAYA (*Stenocereus
pruinusus*) PRESURIZADO Y OZONIZADO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS:

EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

PRESENTA:

BEATRIZ QUIROZ GONZÁLEZ



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

Bajo la supervisión de: DRA. MARÍA DEL ROSARIO GARCÍA MATEOS



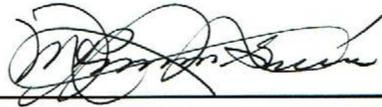
Chapingo, Estado de México, mayo de 2019

**ESTABILIDAD MICROBIOLÓGICA, SENSORIAL Y NUTRACÉUTICA DE
JUGO DE PITAYA (*Stenocereus pruinosus*) PRESURIZADO Y OZONIZADO**

Tesis realizada por **BEATRIZ QUIROZ GONZÁLEZ** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

DIRECTOR: _____



DRA. MARÍA DEL ROSARIO GARCÍA MATEOS

CO-DIRECTOR: _____



DR. JOSÉ JOEL ENRIQUE CORRALES GARCÍA

ASESOR: _____



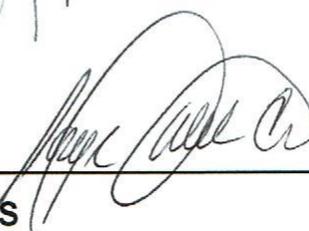
DRA. MA. CARMEN YBARRA MONCADA

ASESOR: _____



DR. GABRIEL LEYVA RUELAS

ASESOR Y LECTOR EXTERNO: _____



DR. JORGE SANTOS WELTI CHANÉS

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
DEDICATORIA	xiii
AGRADECIMIENTOS	xiv
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xvii
RESUMEN GENERAL.....	xviii
GENERAL ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Generalidades de la pitaya	4
2.1.1. Importancia económica de la pitaya	5
2.1.2. Importancia nutraceutica de la pitaya.....	5
2.2. Tecnologías para la preservación de alimentos.....	7
2.2.1. Alta Presión Hidrostática	7
2.2.2. Ozono.....	15
2.3. Literatura citada	22
3. PITAYA (<i>Stenocereus</i> spp.): UN FRUTO SUBUTILIZADO	33
3.1. Resumen	33
3.2. Introducción	34
3.3. Descripción botánica.....	34
3.4. Distribución	38
3.5. Cultivo.....	38
3.6. Importancia económica.....	38
3.7. Fisiología de la pitaya	39

3.8. Aspectos pre y poscosecha	40
3.9. Calidad nutricional	42
3.10. Calidad nutraceutica	44
3.11. Usos agroindustriales	48
3.12. Usos medicinales.....	49
3.13. Conclusiones	49
3.14. Literatura citada	50
4. INACTIVACIÓN Y RECUPERACIÓN DE <i>Listeria innocua</i> Y <i>Saccharomyces cerevisiae</i> EN JUGO DE PITAYA (<i>Stenocereus pruinosus</i>) TRATADO CON ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA	61
4.1. Resumen	61
4.2. Introducción	62
4.3. Materiales y métodos.....	64
4.3.1. Material vegetal.....	64
4.3.2. Reactivos	65
4.3.3. Material biológico	65
4.3.4. Procesamiento del jugo con altas presiones hidrostáticas (APH) .	67
4.3.5. Análisis estadístico.....	68
4.4. Resultados y discusión	69
4.4.1. Efecto del <i>Come-Up Time</i> sobre la población de <i>S. cerevisiae</i>	69
4.4.2. Efecto del <i>Come-Up Time</i> sobre la población de <i>L. innocua</i>	70
4.4.3. Efecto de la alta presión hidrostática sore la población de <i>L. innocua</i>	71
4.4.4. Validación del modelo de superficie de respuesta	73
4.4.5. Evaluación del potencial de recuperación de <i>L. innocua</i> durante el almacenamiento refrigerado (15 d)	74
4.4.6. Evaluación del potencial de recuperación de <i>S. cerevisiae</i> durante el almacenamiento refrigerado (15 d)	75
4.5. Conclusiones	76

4.6.	Agradecimientos	76
4.7.	Literatura citada	77
5.	ALMACENAMIENTO REFRIGERADO DE JUGO DE PITAYA (<i>Stenocereus pruinosus</i>) TRATADO CON ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS	81
5.1.	Resumen	81
5.2.	Introducción	82
5.3.	Materiales y métodos.....	83
5.3.1.	Material vegetal.....	83
5.3.2.	Aplicación de APH.....	83
5.3.3.	Efecto de APH sobre la microbiota nativa en el jugo.....	84
5.3.4.	Efecto de la APH sobre la actividad de la enzima PME	84
5.3.5.	Efecto de la APH sobre el comportamiento reológico del jugo.....	85
5.3.6.	Efecto de la APH sobre pH, SST y contenido de ácido málico	86
5.3.7.	Efecto de la APH sobre los parámetros de color.....	86
5.3.8.	Efecto de la APH sobre compuestos nutraceuticos y actividad antioxidante	86
5.3.9.	Efecto de la APH sobre la aceptabilidad global de los jugos.....	88
5.3.10.	Análisis estadístico.....	88
5.4.	Resultados y discusión	89
5.4.1.	Effect of APH sobre la microbiota nativa en el jugo	89
5.4.2.	Efecto de la APH sobre la actividad de la enzima PME	91
5.4.3.	Efecto de la APH sobre el comportamiento reológico del jugo.....	93
5.4.4.	Efecto de la APH sobre pH, SST y contenido de ácido málico	94
5.4.5.	Efecto de la APH sobre los parámetros de color.....	94
5.4.6.	Efecto de la APH sobre compuestos nutraceuticos y actividad antioxidante	95
5.4.7.	Efecto de la APH sobre la aceptabilidad global de los jugos.....	100
5.5.	Conclusiones	102
5.6.	Agradecimientos	102

5.7. Literatura citada	102
6. SINERGISMO OZONO-ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE JUGO DE PITAYA (<i>Stenocereus pruinosus</i>) ALMACENADO.....	109
6.1. Resumen	109
6.2. Introducción	110
6.3. Materiales y métodos.....	112
6.3.1. Material vegetal	112
6.3.2. Reactivos	112
6.3.3. Material biológico	113
6.3.4. Experimento 1. Efecto del ozono y alta presión hidrostática sobre <i>L. innocua</i> y <i>S. cerevisiae</i>	114
6.3.5. Experimento 2. Efecto de la combinación ozono-APH.....	115
6.3.6. Experimento 3. Validación del daño letal de <i>L. innocua</i> y <i>S. cerevisiae</i>	116
6.3.7. Experimento 4. Vida de anaquel del jugo tratado con la combinación O ₃ -APH	116
6.3.8. Análisis estadístico.....	119
6.4. Resultados y discusión	121
6.4.1. Efecto del ozono o alta presión hidrostática sobre <i>L. innocua</i> y <i>S. cerevisiae</i>	121
6.4.2. Efecto de la combinación ozono-APH.....	122
6.4.3. Validación del daño letal de <i>L. innocua</i> y <i>S. cerevisiae</i>	126
6.4.4. Vida de anaquel del jugo tratado con la combinación O ₃ -APH ...	127
6.5. Conclusiones	134
6.6. Agradecimientos	134
6.7. Literatura citada	134
7. CONCLUSIONES GENERALES.....	140
8. APÉNDICES.....	141

6.1.	Cuadros de datos no mostrados en el texto	141
6.2.	Figuras no mostradas en el texto.....	145
6.3.	Evidencias de participación en Congresos	147
6.4.	Evidencias de publicación de artículos científicos	149

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Especies de <i>Stenocereus</i> (pitayos) endémicas de México.....	37
Cuadro 2. Peso de frutos de algunas especies de pitaya (<i>Stenocereus</i> spp.) de mayor comercialización.	38
Cuadro 3. Composición química de la pulpa de frutos de algunas especies de pitaya (<i>Stenocereus</i> spp.).....	43
Cuadro 4. Composición y contenido (mg kg ⁻¹) mineral en frutos de pitaya (<i>Stenocereus pruinosus</i>) de las variantes roja y anaranjada.	44
Cuadro 5. Concentración de nutraceuticos y actividad antioxidante en la pulpa de algunas especies de pitaya (<i>Stenocereus</i> spp.).....	46
Cuadro 6. Diseño compuesto central (superficie de respuesta), con las condiciones de procesamiento del jugo de pitaya y los datos codificados.....	68
Cuadro 7. Efecto del <i>Come-Up Time</i> (CUT) sobre la inactivación de <i>Listeria innocua</i> en jugo de pitaya.	70
Cuadro 8. Efecto del nivel de presión y tiempo de tratamiento con APH sobre la inactivación de <i>Listeria innocua</i> en jugo de pitaya.	72
Cuadro 9. Validación del modelo de superficie de respuesta (simplificado) para la predicción de la inactivación de <i>Listeria innocua</i> en jugo de pitaya tratado con APH ²	74
Cuadro 10. Recuperación de <i>L. innocua</i> en jugo de pitaya después de 15 d de almacenamiento a 4 ± 1°C.....	75
Cuadro 11. Sobrevivencia de <i>S. cerevisiae</i> en jugo de pitaya tratado con APH ² y almacenado a 4 ± 1°C.	76
Cuadro 12. Sobrevivencia de la población de hongos y levaduras en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C.	91
Cuadro 13. Cambios del contenido de ácido málico en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media ± desviación estándar).	94

Cuadro 14. Cambio neto de color y ángulo de tono en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media \pm desviación estándar).....	97
Cuadro 15. Cambios en el contenido de betalaínas totales y betacianinas ($\text{mg g}^{-1} \text{bs}^2$) en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media \pm desviación estándar).....	99
Cuadro 16. Cambios en el contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media \pm desviación estándar).....	101
Cuadro 17. Cambios en la aceptabilidad del jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C.....	101
Cuadro 18. Diseño compuesto central (superficie de respuesta) con las condiciones de procesamiento del jugo de pitaya (presión y tiempo de ozonizado) y los datos codificados.....	116
Cuadro 19. Reducción de <i>L. innocua</i> y <i>S. cerevisiae</i> (Log UFC mL^{-1}) en jugo de pitaya tratado con ozono o APH (media \pm desviación estándar).....	122
Cuadro 20. Efecto sinérgico de O_3 -APH sobre la inactivación de <i>L. innocua</i> en jugo de pitaya.....	124
Cuadro 21. Cambios en la microbiota nativa ($\text{log}_{10} \text{UFC mL}^{-1}$) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C).	128
Cuadro 22. Cambios en el contenido de betalaínas y fenoles totales (mg mL^{-1}) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C).....	131
Cuadro 23. Cambios en el contenido de betacianinas y betaxantinas en el jugo de pitaya sin tratar, y tratado con la combinación ozono-APH, durante el almacenamiento a 5 ± 2 °C.....	132
Cuadro 24. Cambios en la actividad antioxidante ($\mu\text{m equivalentes de Trolox mL}^{-1}$) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C).	133
Cuadro 25. Resultados de la prueba de preferencia aplicada en jugo de pitaya sin tratar y tratado con la combinación ozono-APH.	134
Cuadro 26. Efecto del <i>Come-Up Time</i> (CUT) sobre la inactivación de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> en jugo de pitaya.	141

Cuadro 27. Parámetros reológicos n y K de jugo de pitaya durante el almacenamiento (4 ± 1 °C).	142
Cuadro 28. Cambios de pH y SST en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (4 ± 1 °C).	142
Cuadro 29. Cambios en luminosidad e índice de saturación de color en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (4 ± 1 °C).....	143
Cuadro 30. Cambios en el contenido de betaxantinas (mg g^{-1} bs) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (4 ± 1 °C).....	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cambios estructurales y funcionales en los microorganismos causados por la presión. Fuente: elaboración propia con datos de Lado & Yousef (2002).	10
Figura 2. Estrés, daño, adaptación y resistencia de los microorganismos por efecto del procesamiento. Fuente: elaboración propia con datos de Lado & Yousef (2002).	11
Figura 3. Proceso de inactivación microbiana por ozono. Fuente: elaboración propia con datos de Asokapandian et al. (2018).	17
Figura 4. A) árbol y B) flores del pitayo, C) espinas y D) pulpa de la pitaya (<i>Stenocereus pruinosus</i>).	36
Figura 5. Gráfica de contornos de la inactivación de la población de <i>L. innocua</i> en jugo de pitaya tratado con APH.	73
Figura 6. Sobrevivencia de la población de mesófilos aerobios en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C. Barras verticales indican la desviación estándar (n = 6); letras minúsculas indican la evaluación de todos los jugos durante 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados durante 60 d. No existe diferencia significativa entre las medias que comparten la misma letra (prueba Tukey, p = 0.05).	90
Figura 7. Cambios en la actividad residual de la enzima PME (%) en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C. Barras verticales indican la desviación estándar (n = 6). No existe diferencia significativa (en cada variable) entre los valores que comparten la misma letra (prueba Tukey, p > 0.05). Letras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d.	92

Figura 8. Viscosidad aparente de jugo de pitaya tratado con 550 y 600 MPa durante 16 y 12 min, respectivamente, y almacenado por 0, 15 y 60 d ($4 \pm 1^\circ\text{C}$).	93
Figura 9. Efecto sinérgico de O_3 -APH sobre la inactivación de <i>S. cerevisiae</i> en jugo de pitaya (media \pm desviación estándar, $n = 3$). ^z Flujo de ozono: $24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$. ^y Tiempo de procesamiento de cada presión: 5 min. ^x Población inicial: $6.98 \pm 0.34 \log_{10} \text{ UFC mL}^{-1}$. Barras verticales indican la desviación estándar. Medias con letras diferentes, indican diferencias significativas (prueba Tukey, $p < 0.05$).	123
Figura 10. Superficie de respuesta de la reducción de <i>L. innocua</i> en jugo de pitaya tratado con ozono ($24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$) y alta presión hidrostática (5 min).	125
Figura 11. Comportamiento de la población microbiana de <i>S. cerevisiae</i> y <i>L. innocua</i> en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado ($5 \pm 2^\circ\text{C}$). 7 min ozono+316 MPa: aplicación de 7 min de ozono con un flujo de $24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ más 316 MPa durante 5 min. Barras verticales indican la desviación estándar. Medias con letras minúsculas y mayúsculas diferentes indican diferencias significativas de la población de <i>L. innocua</i> y <i>S. cerevisiae</i> , respectivamente (prueba Tukey, $p < 0.05$).	127
Figura 12. Cambios en los parámetros de color: cambio neto de color (A), luminosidad (B), índice de saturación de color (C) y ángulo de tono (D) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado ($5 \pm 2^\circ\text{C}$). Jugo tratado= jugo ozonizado ($24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$) por 7 min, y después presurizado a 316 MPa (5 min). Barras verticales indican la desviación estándar. Medias con letras diferentes (por cada parámetro de color) indican diferencias significativas (prueba Tukey, $p < 0.05$).	129
Figura 13. Curva de crecimiento de <i>L. innocua</i> (A) y <i>S. cerevisiae</i> (B).	145
Figura 14. Curva de crecimiento de <i>L. innocua</i> (A) y <i>S. cerevisiae</i> (B).	146

DEDICATORIA

A mi esposo: **Israel Dionicio y de Jesús**

Sin tí, este logro definitivamente hubiera sido imposible.

La entrega que muestras todo el tiempo para que toda tu familia esté bien, ignorando las adversidades, realmente me ha sorprendido.

“Dios bendiga nuestro amor”

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque sin Él, nada tendría sentido.

Te agradezco Señor porque nunca te apartas de mí. Te agradezco por todo lo que me has dado y prometo ponerlo a disposición de los demás; asimismo, te agradezco por lo que no me has concedido porque Tú eres sabio, y sabes que no lo necesito o aún no estoy preparada para recibirlo. Te agradezco por estar a mi lado en cada momento feliz y difícil de mi vida orientándome para canalizar esos sentimientos en pro de mi fortaleza espiritual.

A la Universidad Autónoma Chapingo por que gracias a su apoyo he llegado a realizar una de las más grandes metas en la vida, los estudios doctorales, cuyos conocimientos estarán disponibles siempre para el apoyo del desarrollo de la agroindustria y el campo mexicano.

Al CONACyT por la beca (265456) otorgada para realizar mis estudios doctorales y estancia de investigación.

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM, campus Monterrey) por abrirme las puertas de sus instalaciones para realizar la fase experimental de mi proyecto de tesis.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, especialmente al Dr. Alberto Tecante Coronel y a la I.A. Mariana Ramírez Gilly por el apoyo en la fase experimental y el entusiasmo por compartir sus conocimientos respecto al manejo del equipo de altas presiones hidrostáticas.

A la familia Larios Luna, por que amablemente y de manera incondicional donaron la fruta empleada durante la investigación.

A mis hijos, porque son mi inspiración, mi fuerza e incluso, a veces mi refugio.

A mis padres, por creer en mí, lo cual me dio el valor de llevar a este nivel mi vida. Gracias por la oportunidad que me dieron de salir de casa para buscar mi desarrollo profesional, lo cual debió causarles dolor, pero su generosidad y amor hacia mí fueron más grandes, por eso y mucho más siempre los honraré.

A mis hermanos, porque son mi motivación cuando veo el amor y la entrega de ustedes hacia su trabajo.

Mis profesores, por el esmero en prepararnos para formarnos de acuerdo con el objetivo del posgrado, siempre apegados a la rigurosidad que caracteriza un posgrado de calidad.

Mis asesores

Dra. María del Rosario García, por sus consejos y su entrega para prepararme como una persona digna del título de doctora.

Dr. Joel Corrales, por su amabilidad y porque además de sus conocimientos me brindó su amistad y apoyo en momentos difíciles de mi vida.

Dra. Carmen Ybarra, por su apoyo personal y académico. Por su interés en formar doctores que puedan trascender y poner en alto el nombre de la UACH. Por su compromiso con el posgrado y con sus alumnos.

Dr. Gabriel Leyva, por su paciencia y la disposición de apoyarme incluso cuando no era mi asesor (en la licenciatura), siempre me ha apoyado de manera incondicional con la amabilidad que lo caracteriza.

Dr. Jorge Welti y Dra Verónica Rodríguez por su invaluable apoyo recibido antes, durante y después de la estancia de investigación realizada. La estancia

en el ITESM fue una agradable y enriquecedora experiencia, gracias a la entrega y el compromiso de ustedes en este proyecto.

Dr. J. Antonio Torres por su entusiasmo, destreza y sus atinados comentarios durante la redacción de las publicaciones.

Dr Arturo por sus sabias palabras y recomendaciones recibidas.

Mis compañeras de generación Diana Becerra, Irene Arenales y Guadalupe Crispín, porque me hicieron muy ameno el paso por este camino, cada una con diferencias en la forma de ser, pero que juntas hacíamos un grupo agradable y muchas veces divertido.

Bernabé Laureano, Rosa López y Flor Guerrero por su amistad eterna, aunque de lejos pero siempre estuvieron presentes con una llamada o en el pensamiento. Ustedes tienen poderes extraordinarios, porque, aunque estuvieron lejos, siempre tocaron mi corazón.

A Lety por tu apoyo incondicional y tus palabras de aliento.

Perita, Melchor y Arely por su presto apoyo y amabilidad, los alumnos de este posgrado somos afortunados de contar con ustedes.

Ingeniero Cecilio, por su apoyo y/o sugerencias durante el trabajo en laboratorio.

A la Dra Diana Guerra, por abrirme amablemente las puertas del Laboratorio de Productos Naturales de la UACH, y por sus recomendaciones durante el trabajo en laboratorio.

A la Comunidad Evangelizadora para la Reconciliación y el Servicio (CERS), por sus oraciones y comprensión durante este proceso.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Beatriz Quiroz González

Fecha de nacimiento: 10 de agosto de 1987

Lugar de nacimiento: Ciudad Valles, San Luis Potosí

CURP: QUGB870810MSPRNT08

Cédula profesional: 7392943 (Licenciatura) y 9660466 (Maestría)

Desarrollo académico

Ingeniero Agroindustrial

Maestro en Ciencias en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria

RESUMEN GENERAL

Estabilidad microbiológica, sensorial y nutracéutica de jugo de pitaya (*Stenocereus pruinosus*) presurizado y ozonizado

La pitaya es una fruta con fitoquímicos de importancia nutracéutica; sin embargo, es subutilizada, perecedera y de estacionalidad limitada. Aunque la pasteurización del jugo de pitaya es una opción viable para extender su vida de anaquel, los tratamientos térmicos causan cambios indeseables en su calidad sensorial y nutrimental. Algunas tecnologías emergentes han mostrado que su aplicación en diversos jugos permite la preservación de compuestos bioactivos sin afectar sus propiedades sensoriales. El efecto de la alta presión hidrostática (APH) se evaluó individualmente y en combinación con ozono sobre la inocuidad, estabilidad enzimática, propiedades fisicoquímicas, compuestos bioactivos, actividad antioxidante y aceptabilidad sensorial del jugo de pitaya almacenado hasta 60 días a 5 ± 2 °C. Un jugo de pitaya inoculado con *Saccharomyces cerevisiae* y *Listeria innocua* se trató con APH (400-600 MPa por 7.6-15 min) y ozono-APH [1.8-9.6 min de ozono ($24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) y 179-321 MPa] siguiendo un diseño compuesto central con dos factores. Los resultados fueron analizados mediante la metodología de superficie de respuesta, medidas repetidas y/o prueba de Tukey. *L. innocua* fue reducida $>5 \log_{10}$ CFU mL^{-1} mediante la aplicación de 550 MPa/16 min y 600 MPa/12 min, mientras que *S. cerevisiae* fue eliminada con 300 MPa/5 min. Una reducción similar de *L. innocua* se logró con la aplicación de 7 min de ozono, seguido de 316 MPa/5 min ($7\text{O}_3/316$ MPa). Los jugos tratados con 550 MPa /16 min y 600 MPa/12 min se mantuvieron inocuos durante todo el periodo de almacenamiento (60 d), mientras que el jugo tratado con $7\text{O}_3/316$ MPa se mantuvo inocuo sólo por 30 d. Al final del almacenamiento, los jugos fueron aceptados sensorialmente. La APH no disminuyó los compuestos bioactivos, contrario a lo ocurrido en jugos tratados con ozono-APH. No obstante, la APH y la combinación ozono-APH son una opción viable para aplicaciones comerciales.

Palabras clave: jugo de fruta, tecnología no térmica, antioxidantes, usos agroindustriales.

Tesis de Doctorado en Ciencias, en Ciencias Agroalimentarias, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Beatriz Quiroz González
Director de Tesis: Dra. María del Rosario García Mateos

GENERAL ABSTRACT

Microbiological, sensorial, and nutraceutical stability of pressurized and ozonated pitaya (*Stenocereus pruinosus*) juice

The pitaya is a fruit with phytochemicals of nutraceutical importance; however, it is underutilized, perishable, and of limited seasonality. Although pasteurization of pitaya juice is a viable option to extend its shelf-life, thermal treatments cause undesirable changes in its sensory and nutritious quality. Some emerging technologies have demonstrated that their application in different juices allows the preservation of bioactive compounds without affecting their sensory properties. The effect of high hydrostatic pressure (HHP) was individually evaluated and in combination with ozone over the safety, enzymatic stability, physicochemical properties, bioactive compounds, antioxidant activity, and sensory acceptability of pitaya juice stored up to 60 d at 5 ± 2 °C. Pitaya juice inoculated with *Saccharomyces cerevisiae* and *Listeria innocua* was treated with HHP (400-600 MPa for 7.6-15 min) and ozone-HHP [1.8-9.6 min of ozone ($24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) and 179-321 MPa] following a two-factor central composite design. Results were analyzed by response surface methodology, repeated measures, and/or Tukey's test. *L. innocua* was reduced $>5 \log_{10} \text{ CFU mL}^{-1}$ by application of 550 MPa/16 min and 600 MPa/12 min, while *S. cerevisiae* was eliminated with 300 MPa/5 min. A similar reduction of *L. innocua* was achieved with 7 min ozone, followed by 316 MPa/5 min ($7\text{O}_3/316 \text{ MPa}$). Juices treated with 550 MPa /16 min and 600 MPa/12 min remained microbiologically safe during the entire storage period (60 d), while juice treated with $7\text{O}_3/316 \text{ MPa}$ was safe only for 30 d. At the end of the storage period, juices were sensorially acceptable. HHP alone did not decrease bioactive compounds, contrary to what happened with ozone-HHP. However, any of the evaluated treatments is a viable option for commercial applications.

Keywords: fruit juice, non-thermal technology, antioxidants, agroindustrial uses.

Doctoral Thesis in Science, in Agri-Food Sciences, Agroindustrial Engineering Department, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Beatriz Quiroz González

Advisor: Dra. María del Rosario García Mateos

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los conceptos “alimento” y “salud” han incrementado su importancia en la sociedad actual. El ser humano ha desarrollado particular sensibilidad frente a la posible relación entre su estado de salud y los alimentos que consume (Bello, 2001; Gul, Singh, & Jabeen, 2016). Esta situación ha provocado un cambio del simple concepto de alimento como fuente de nutrientes, a uno más integral que destaca la importancia y potencialidad de los alimentos como fuente de sustancias nutraceuticas (compuestos fenolicos, flavonoides, betalaínas, antocianinas, carotenos) y otros metabolitos antioxidantes como vitamina C, metabolitos determinantes en la prevención de algunas enfermedades crónico-degenerativas (Premier, 2002; Dutta, Ali, Dash, & Giri, 2018; Ralston, R. A., Mackey, A. D., Simons, C. T., & Schwartz, 2018).

Actualmente, la investigación se ha orientado al estudio de alimentos funcionales/nutraceuticos principalmente frescos y mínimamente procesados. Los frutos frescos son una importante fuente de nutraceuticos y sustancias antioxidantes, pero poco comercializados por su corta vida de anaquel. El procesamiento térmico es usado comúnmente para la inactivación de microorganismos y enzimas responsables del deterioro de los alimentos (Chipurura & Muchuweti, 2010), sin embargo, los procesos térmicos causan modificaciones indeseables a las propiedades fisicoquímicas (Asokapandian, Periasamy, & Swamy G., 2018), atributos sensoriales (sabor, aroma y color) y compuestos bioactivos (compuestos fenolicos, vitaminas y pigmentos), (Chipurura & Muchuweti, 2010; Asokapandian, Periasamy & Swamy 2018).

Por lo anterior, las tecnologías no térmicas, tales como la alta presión hidrostática (APH), campos eléctricos pulsantes, radiación, ultrasonido y ozono están relacionadas con las tendencias actuales del consumidor (Ochoa-velasco & Beltrán, 2013; García, Guerrero, & Alzamora, 2015; Jaramillo-Sánchez, García Loredó, Gómez, & Alzamora, 2018), debido a que éstos demandan alimentos de calidad, inocuos, frescos, nutritivos y libres de aditivos (Patil, Bourke, Frias, Tiwari, & Cullen, 2009; Welti-Chanes, Ochoa-Velasco, & Guerrero-Beltrán, 2009).

En esta tesis, se propuso la elaboración de un jugo de pitaya (*Stenocereus griseus*), ya que esta fruta que ha sido descrita como un alimento nutraceutico potencial, por su elevado contenido de betalaínas en la pulpa (Leticia García-Cruz, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & Joaquín-Cruz, 2013), las cuales proveen efectos antioxidantes y reducen el riesgo de enfermedades crónico-degenerativas (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009; Pérez-Loredó, García-Ochoa, & Barragán-Huerta, 2016); no obstante, esta fruta tiene una corta vida de anaquel y su estacionalidad es limitada (Ochoa-velasco & Beltrán, 2013; García-Cruz, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & Luna-Morales, 2016). Por lo tanto, para aprovechar las propiedades de esta fruta sin provocar la afectación de estas, se evaluó el efecto de la APH y el ozono sobre la inocuidad, actividad de la enzima pectinmetilesterasa, propiedades fisicoquímicas y fitoquímicas, actividad antioxidante, y la aceptabilidad y preferencia sensorial del jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C). Para lograr lo anterior, se desarrollaron cuatro etapas, las cuales se describen a partir del Capítulo 3 de la presente tesis.

El **Capítulo 3** se enfoca en el estado del arte de algunas propiedades de la pitaya, se muestra su descripción botánica, distribución, cultivo, fisiología, aspectos pre y poscosecha, composición nutricional y nutraceutica, también se describe el uso agroindustrial y medicinal de esta fruta. Esto con el objetivo de promover su estudio, difusión, producción, consumo y uso agroindustrial. En este estudio se identificó la falta de información relacionada con el manejo poscosecha y la calidad nutraceutica de esta fruta.

En el **Capítulo 4** se evaluó el efecto de la APH sobre la inactivación de *Listeria innocua* y *Saccharomyces cerevisiae* en el jugo de pitaya (sin acidificar) almacenado 15 d a 4 ± 1 °C, para evaluar un posible daño subletal provocado por los tratamientos. Se estudió *L. innocua* y *S. cerevisiae* debido a la importancia para la salud humana y la calidad del jugo. Este trabajo demostró que la APH es una alternativa no térmica viable para la obtención de un jugo de pitaya inocuo.

En el **Capítulo 5** se evaluó el efecto de la APH (tratamientos seleccionados en el estudio previo) sobre la microbiota nativa, actividad de la enzima pectinmetilesterasa y sobre la estabilidad fisicoquímica, nutraceútica y sensorial del jugo de pitaya durante el almacenamiento (60 d, 4 ± 1 °C). La APH no afectó las variables evaluadas, contrario a lo observado por efecto del almacenamiento.

Finalmente, en el **Capítulo 6** se investigó el efecto sinérgico entre el ozono y la APH sobre la inocuidad, y calidad fitoquímica y sensorial del jugo de pitaya (*Stenocereus pruinosus*) almacenado 35 d, a 5 ± 2 °C. Esto con la finalidad de aplicar el menor nivel de presión y ozono para la estabilización microbiológica (*L. innocua*, *S. cerevisiae* y microbiota nativa), el color y las propiedades fitoquímicas y antioxidantes durante el almacenamiento. Se encontró un efecto sinérgico entre ozono y APH; sin embargo, se observaron cambios en el color y compuestos bioactivos por efecto del tratamiento y del almacenamiento.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades de la pitaya

El pitayo pertenece al Orden: *Caryophyllales*; Familia: *Cactaceae* y Tribu: *Pachycereeae* (Mercado & Granados, 2002). En América Latina, los frutos de los géneros *Stenocereus*, *Cereus*, *Selenicereus* y *Hylocereus* se denominan “pitahaya”, un nombre genérico y vernáculo. Sin embargo, “Pitaya” y “pitahaya” se han utilizado como sinónimos de manera incorrecta (Hunt, Taylor, & Charles, 2006; Le Bellec, Vaillant, & Imbert, 2006); “pitaya” corresponde a los frutos del género *Stenocereus* (Ortiz, 1999; García-Suárez, Carreto-Montoya, Cárdenas-Navarro, Díaz-Pérez, & López-Gómez, 2007) mientras que “pitahaya” al género *Hylocereus* (Ortiz, 1999).

Se han reportado 24 especies comestibles de pitaya (*Stenocereus* spp.) en América (Terrazas, Loza-Cornejo, & Arreola-Nava, 2005; Rosales-Bustamante, Luna-Morales, & Cruz-León, 2009), de las cuales 20 son endémicas de México (Arreola-Nava & Terrazas, 2004; Bárcenas & Jiménez, 2010), por lo que se podría considerar su centro de origen (Esquivel, 2004; Reyes-Agüero, Aguirre, & Valiente-Banuet, 2006; Novoa, Le Roux, Robertson, Wilson, & Richardson, 2015).

Recientemente, esta cactácea ha sido motivo de atención comercial por el agradable sabor que tienen sus frutos suculentos, de pulpa jugosa y dulce de gran variedad de coloraciones (blancas, amarillas, moradas y rojas) (Campos-Rojas, Pinedo-Espinoza, Campos-Montiel, & Hernández-Fuentes, 2011; García-Cruz, Salinas-Moreno, & Valle-Guadarrama, 2012).

2.1.1. Importancia económica de la pitaya

En la última década en México se ha incrementado más de diez veces la producción de pitaya hasta alcanzar una producción de 4 500 t (SIAP, 2017). A pesar de ser un fruto de estacionalidad limitada (Ochoa-Velasco & Guerrero-Beltrán, 2012), este cultivo podría otorgar beneficios significativos a los agricultores, por la poca demanda de agua que requiere (Barrios, 2013). Adicionalmente, el cultivo de esos frutos podría considerarse una alternativa para el aprovechamiento de los recursos fitogenéticos y su estudio podría mejorar su manejo y comercialización con la intención de darle un valor agregado (Quiroz-González, García-Mateos, Corrales-García, & Colinas-León, 2018).

De las especies que se localizan en México, *S. queretaroensis* (Pimienta-Barrios & Nobel, 1995; Granados, Mercado, & López, 1999; García-Suárez, Carreto-Montoya, Cárdenas-Navarro, Díaz-Pérez, & López-Gomez, 2007), *S. stellatus*, *S. griseus*, *S. pruinosis* (García-Suárez, Carreto-Montoya, Cárdenas-Navarro, Díaz-Pérez, & López-Gomez, 2007; Granados *et al.*, 1999), *S. treleasei*, *S. fricci* y *S. quevedonis* comprenden las de mayor aprovechamiento comercial (Granados *et al.*, 1999). La especie *S. queretaroensis* es la de consumo más extendido en el país (Gudiño & De la Barrera, 2014). Los frutos de las especies *S. griseus* (pitaya de mayo) y *S. stellatus* (pitaya agria) se cultivan principalmente en la región Mixteca de Oaxaca. Las tres últimas especies mencionadas son importantes en la economía de muchas comunidades rurales de algunas zonas semiáridas de México (López, Díaz, & Flores, 2000). Las especies restantes se cultivan en huertos de traspatio y otras sólo se obtienen mediante recolección (Arreola-Nava, 1999; Granados *et al.*, 1999; Luna-Morales, 2004) para autoconsumo y/o comercialización local (García-Suárez, Carreto-Montoya, Cárdenas-Navarro, Díaz-Pérez, & López-Gomez, 2007).

2.1.2. Importancia nutraceútica de la pitaya

Entre los metabolitos de importancia nutraceútica en la pitaya destacan las betalaínas; estos pigmentos se restringen a las familias del orden *Caryophyllales* (Brockington *et al.*, 2015; Patricia Esquivel & Araya Quesada, 2012; Khan &

Giridhar, 2015), los cuales son responsables del color de la pulpa y de la cáscara de pitaya, tuna, xoconostle y pitaya (García-Cruz, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & Joaquín-Cruz, 2013; Grimaldo-Juárez, Terrazas, García-Velásquez, Cruz-Villagas, & Ponce-Medina, 2007; Liaotrakoon *et al.*, 2013; López, García, Gallegos, & Sahagún, 2015; Yahia & Mondragon-Jacobo, 2011). Estos metabolitos se derivan biosintéticamente del ácido betalámico y se agrupan en betacianinas y betaxantinas; las primeras, son responsables de las coloraciones rojo-púrpura y las betaxantinas de los colores amarillo-anaranjado (Patricia Esquivel, Stintzing, & Carle, 2007; Zrýd & Christinet, 2004), ayudan en la prevención de cáncer, evitan la oxidación de lípidos de las membranas por sus propiedades antioxidantes (Livrea & Tesoriere, 2006), no presentan efectos tóxicos en humanos como algunos pigmentos sintéticos (Sumaya-Martínez, Suárez, Cruz, Alanís, & Sampedro, 2010), también se usan en la industria de alimentos (Bárcenas & Jiménez, 2010; Rivera, Bocanegra-García, & Monge, 2010) y cosmética (Bárcenas & Jiménez, 2010).

Otros metabolitos de importancia, contenidos en la pitaya son los compuestos fenólicos (Kanellis *et al.*, 2014). Se ha identificado una mayor concentración de estos metabolitos en pitayas de pulpa roja en comparación con de las de pulpa anaranjada y blanca (García-Cruz *et al.*, 2012; García-Cruz *et al.*, 2013; Pérez-Loredo, García-Ochoa, & Barragán-Huerta, 2016); aunque, la actividad antioxidante es mayor en las variedades blancas (Pérez-Loredo *et al.*, 2016). Algunos autores han reportado que el ácido ascórbico es también una fuente importante de antioxidantes en algunos frutos, particularmente en pitaya (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009), en tuna (Kuti, 2004; Ramírez-Ramos, García-Mateos, Corrales-García, Ybarra-Moncada, & Castillo-González, 2015) y xoconostle (López *et al.*, 2015). Se ha reportado que las variedades de pitaya amarilla y blanca presentan mayores concentraciones de ácido ascórbico, por lo tanto, muestran una mayor actividad antioxidante que las variedades rojas que contienen concentraciones menores (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009). Al respecto, se ha propuesto que el consumo de 100 g de pulpa de pitaya cubre 21 % de la recomendación de la ingesta diaria (60 mg d⁻¹) para adultos (Beltrán-Orozco,

Oliva-Coba, & Gallardo-Velázquez, 2005). Al respecto, se ha documentado que el consumo de pitayas, principalmente de las variedades amarillas y blancas proveen una protección contra los radicales libres similar ($17 \mu\text{mol g}^{-1}$ equivalente a Trolox g^{-1}) al valor más bajo reportado por las bayas azules del género *Vaccinium* ($16.8 -17.3 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ equivalente a Trolox g^{-1}) (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009; Kähkönen, Hopia, & Heinonen, 2001).

2.2. Tecnologías para la preservación de alimentos

El tratamiento térmico es la tecnología más ampliamente empleada para la inactivación de microorganismos en alimentos. Sin embargo, el calor causa efectos secundarios no deseados sobre las propiedades sensoriales, nutricionales y funcionales de los alimentos. No obstante, debido al incremento de la demanda de alimentos mínimamente procesados "frescos" ha promovido el desarrollo de tecnologías no térmicas para la conservación de los alimentos, tales como los campos eléctricos pulsantes (CEP), APH, ultrasonido (Asokapandian, Periasamy, & Swamy, 2018) y radiación (Lado & Yousef, 2002). Estas tecnologías no térmicas, también llamadas "emergentes" causan poco o ningún efecto sobre los constituyentes de los alimentos, en muchos casos son letales para las esporas, bacterias, levaduras, hongos y virus (Niakousari, Gahrue, Razmjooei, Roohinejad, & Greiner, 2018). Por lo tanto, estas tecnologías están diseñadas para la producción de alimentos inocuos sin la modificación de su calidad nutricia y sensorial (Lado & Yousef, 2002). También se destaca al ozono como una tecnología no térmica, que ha sido aceptada por los consumidores, se usa habitualmente para el lavado de frutas y hortalizas en industrias, en la desinfección de agua embotellada (Asokapandian *et al.*, 2018) y recientemente ha sido estudiado en la preservación de jugos de frutas (Jaramillo-Sánchez *et al.*, 2018; Jaramillo, Garcia, Contigiani, Gómez, & Alzamora, 2017; Patil *et al.*, 2010; Torres *et al.*, 2011).

2.2.1. Alta Presión Hidrostática

El procesamiento con APH es una tecnología de pasteurización en frío, mediante la cual, los productos previamente envasados se introducen en la cámara de

presión para ser tratados con un elevado nivel de presión isostática (300–600 MPa); debido a que la presión es transmitida por el agua contenida dentro de la cámara, la tecnología también se conoce como alta presión hidrostática (Houska & Marques da Silva, 2018).

El uso de la alta presión, a diferencia del tratamiento térmico, tiene la ventaja de que los alimentos tratados con esta tecnología mantienen estables sus propiedades sensoriales y nutricionales, debido a la estabilidad de los enlaces covalentes de proteínas, azúcares, vitaminas, lípidos y pigmentos cuando son sometidos a la APH (Mozhaev, Heremans, Frank, Masson, & Balny, 1994). Asimismo, a diferencia del tratamiento térmico, en el que los tiempos de calentamiento y enfriamiento son largos y hay pérdidas de energía durante el proceso, los cambios de presión son prácticamente instantáneos y dado que es una transmisión isostática, son uniformes. Por lo tanto, el proceso es independiente del volumen y de la geometría de la muestra (Knorr, 1999). Además, una vez que el sistema está bajo presión, no hay requisitos adicionales de energía ni pérdidas de energía (Heremans, 1995).

El comportamiento de los sistemas bioquímicos bajo presión se rige por el principio de Le Chatelier, este postula que la aplicación de presión desvía el equilibrio de un proceso hacia el estado que ocupe menor volumen, y acelera aquellos procesos en los que el estado de transición presenta un volumen menor que el estado inicial; por lo tanto, la presión favorece los procesos que van acompañados de cambios de volumen negativos. Una ventaja del uso de la presión en lugar de la temperatura, porque la temperatura puede afectar tanto la energía interna como el volumen del sistema, y la presión solo afecta el volumen del sistema en estudio (Mozhaev *et al.*, 1994; Mozhaev, Heremans, Frank, Masson, & Balny, 1996).

Los cambios de volumen que acompañan a la formación de la mayoría de las interacciones entre biomoléculas son los siguientes:

- Los enlaces covalentes que forman la estructura primaria de las proteínas son resistentes a presiones de al menos 1000-2000 MPa. La formación de enlaces de hidrógeno está ligeramente favorecida por la presión y los procesos en la reorganización de los enlaces de hidrógeno existentes (la mayoría de las reacciones en soluciones acuosas) tienen valores de cambio de volumen (ΔV) casi nulos, por lo tanto, son insensibles a la presión.

- Los efectos más significativos de la presión se observan en los procesos que involucran interacciones electrostáticas e hidrófobas. Durante la aplicación de la presión los grupos cargados tienen una fuerte tendencia a ordenar las moléculas de agua (electrostricción), y este proceso se caracteriza por una reducción de volumen. Debido a la reorganización de la estructura del agua cerca de fragmentos no polares, este proceso muestra valores ΔV negativos y se ve favorecido por la presión; por lo tanto, la aplicación de APH causa el rompimiento de enlaces electrostáticos e hidrófobos (Gross & Jaenicke, 1994; Mozhaev *et al.*, 1994).

Inactivación microbiana por APH

Los microorganismos son inactivados cuando se exponen a factores que alteran su estructura celular o sus funciones fisiológicas. El daño estructural incluye la ruptura de la cadena de ADN y de la membrana celular. Las funciones celulares se alteran cuando se inactivan enzimas clave o se pierde la selectividad de la membrana (Lado & Yousef, 2002). El crecimiento microbiano se retrasa con presiones entre 20 y 180 MPa; estas presiones también inhiben la síntesis de proteínas (Figura 1) (Hauben *et al.*, 1997; Hoover, 1989). La pérdida de la viabilidad celular inicia con la aplicación de 180 MPa, y la tasa de inactivación aumenta exponencialmente conforme se incrementa la presión. Por encima de 300 MPa se provoca la desnaturalización irreversible de las proteínas, este nivel de presión corresponde al necesario para la inactivación de la mayoría de las células vegetativas y bacteriófagos. Los tratamientos con APH letales son aquellos que causan cambios en la integridad de la membrana celular y

desnaturalización de proteínas (Huang, Lung, Yang, & Wang, 2014; Lado & Yousef, 2002).

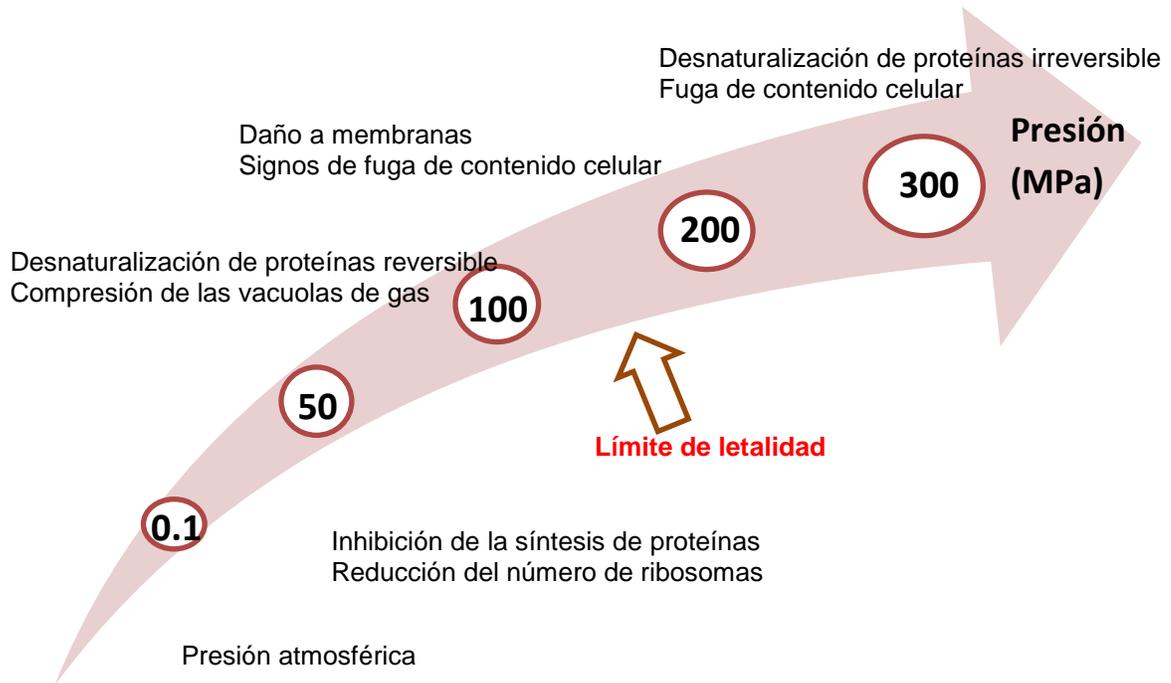


Figura 1. Cambios estructurales y funcionales en los microorganismos causados por la presión. Fuente: elaboración propia con datos de Lado & Yousef (2002).

Durante la aplicación de esta tecnología, es necesario tener en cuenta que, bajo algunas condiciones de procesamiento, es más probable que los microorganismos sólo se estresen o se lesionen levemente. La Figura 2 muestra que el estrés subletal induce la expresión de sistemas de reparación celular y, por lo tanto, la adaptación de los microorganismos al estrés durante el procesamiento de alimentos constituye un peligro potencial (Lado & Yousef, 2002).

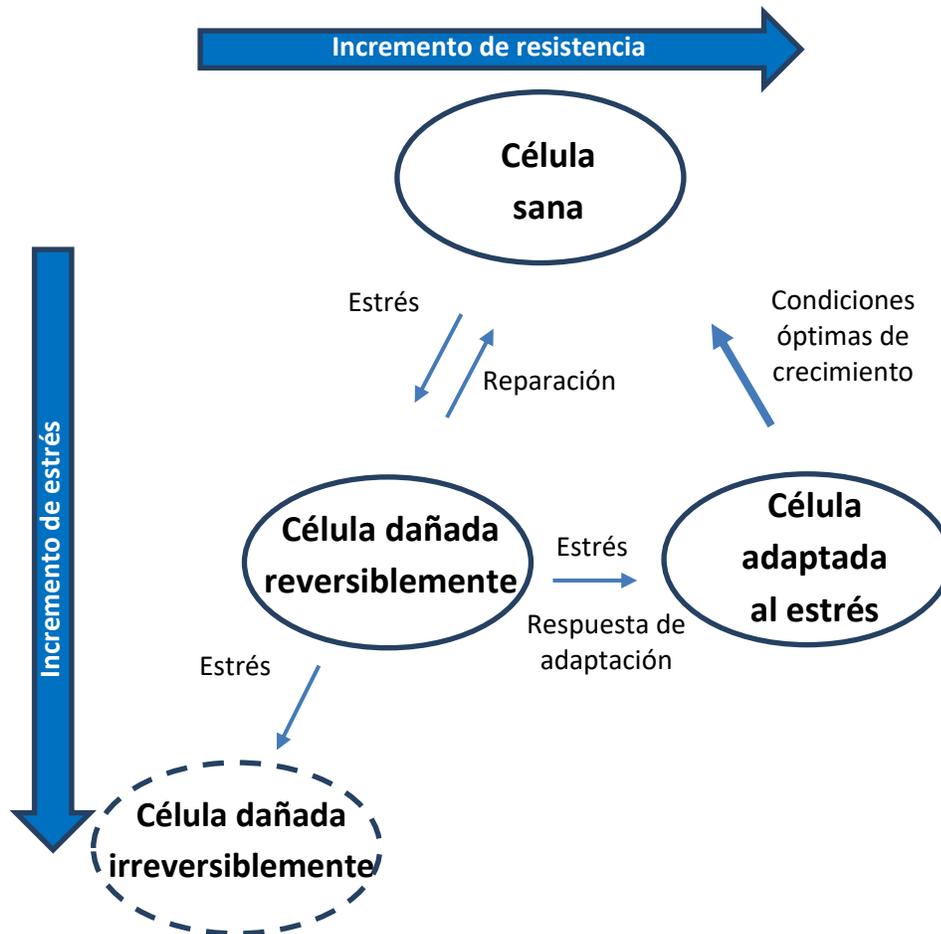


Figura 2. Estrés, daño, adaptación y resistencia de los microorganismos por efecto del procesamiento. Fuente: elaboración propia con datos de Lado & Yousef (2002).

Hsu *et al.* (2008) reportaron la inactivación significativa de mesófilos aerobios, enterobacterias, hongos y levaduras durante el procesamiento de jugo de tomate con 300–500 MPa (25 °C/10 min); estos jugos fueron microbiológicamente estables durante 28 d (a 25 °C). Asimismo, Xu *et al.* (2018) estudiaron el efecto de la APH sobre mesófilos aerobios, levaduras y hongos en jugo de kiwi; estos autores observaron que la aplicación de 500 MPa (10 min) inactivó hongos y levaduras, y mantuvo la población de mesófilos aeróbios por debajo de 2 log (UFC mL⁻¹) durante 42 d (a 4 y 25 °C).

El efecto del CUT (*come up time*, por sus siglas en inglés) también ha sido estudiado; Guerrero-Beltran, Barbosa-Canovas, & Welti-Chanes (2011a)

reportaron un efecto antimicrobiano de la aplicación de 241 MPa durante 2.2 min en néctar de pera, estos autores observaron una reducción de 0.41, 1.46 y 0.07 log (UFC mL⁻¹) de la población de *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli* y *Listeria innocua*, respectivamente. En otro estudio (Guerrero-Beltran *et al.*, 2011b) se logró la reducción de 5.7, 7 y 7.4 log (UFC mL⁻¹) de las poblaciones de *S. cerevisiae*, *E. coli* y *L. innocua* en jugo de naranja tratado con 414 MPa por 3.2 min.

Efecto de la APH sobre compuestos bioactivos

Diversas investigaciones proporcionan evidencias de los beneficios de la APH sobre la retención de micronutrientes y compuestos bioactivos en alimentos vegetales (Westphal, Schwarzenbolz, & Böhm, 2018); al respecto, se ha observado mayor retención e incluso incremento del contenido de compuestos bioactivos en jugos tratados con APH, contrario a lo reportado en jugos procesados térmicamente (Hsu *et al.*, 2008). Por ejemplo, Hsu *et al.* (2008) reportaron un incremento significativo de hasta 62 % en el contenido de carotenoides en jugo de tomate tratado con APH (300–500 MPa / 25 °C/10 min), estos autores señalan que no se observaron cambios en el contenido de estos metabolitos durante el almacenamiento (28 d / 25 °C); no obstante, en los jugos tratados térmicamente (98 °C / 15 min) se observó una reducción de más de 18 %. Patras, Brunton, Da Pieve, Butler, & Downey (2009) también observaron incrementos en el contenido de compuestos bioactivos (fenoles totales, carotenoides y ácido ascórbico) en puré de zanahoria y tomate tratado con 600 MPa (15 min). Xu *et al.* (2018) reportaron un incremento de hasta 4 % del contenido fenólico con la aplicación de 500 MPa (10 min) en jugo de kiwi; no obstante, estos autores mencionan decrementos de hasta 35 % por efecto del almacenamiento (42 d, 4 °C). En otro estudio se encontraron incrementos entre 20 - 43 % en los contenidos de β -caroteno, α -caroteno, zeaxantina, luteína, β -criptoxantina y actividad antioxidante en jugo de naranja tratado con 350 MPa (15 min) (De Ancos, Gonzalez, & Cano, 2000). Westphal, Schwarzenbolz, & Böhm (2018) también mencionaron la estabilidad de la actividad antioxidante en puré de espinaca y rosa mosqueta tratado con 200-600 MPa durante 5-10 min; estos

resultados se asociaron con la estabilidad de las antocianinas y la inactivación de enzimas que participan en la degradación de compuestos bioactivos. De manera particular, las enzimas polifenoloxidasas (PFO), peroxidasa (PO) y β -glucosidasa han sido asociadas con la degradación de antocianinas (Fennema & Tannenbaum, 1996). Al respecto, Garcia-Palazon, Suthanthangjai, Kajda, & Zabetakis (2004) reportaron que la estabilidad de las antocianinas de la fresa y frambuesa es debida a la inactivación completa de la enzima PFO, por efecto del tratamiento con 800 MPa (15 min). Sin embargo, el efecto de la APH sobre la inactivación enzimática depende de los parámetros del procesamiento con APH como presión, tiempo y propiedades fisicoquímicas del alimento (Tiwari, O'donnell, & Cullen, 2009; Tiwari, Cullen, Brennan, & O'Donnell, 2013). A continuación se describe a mayor detalle el efecto de la APH sobre la actividad enzimática.

Efecto de la APH sobre algunas enzimas

Uno de los principales desafíos en la extensión de vida de anaquel de productos de frutas y hortalizas es el control de enzimas endógenas mediante la aplicación de APH, debido a que con frecuencia las enzimas muestran mayor resistencia a las condiciones de alta presión que las bacterias (Terefe, Buckow, & Versteeg, 2014). Las enzimas son biocatalizadores protéicos con alta afinidad a un sustrato específico y por lo general, solo actúan bajo condiciones específicas (temperatura, pH, aw); las moléculas del sustrato están unidas en una hendidura hidrófoba conocida como sitio activo, pequeños cambios estructurales en este sitio activo pueden resultar en una pérdida completa de la actividad enzimática (Tsou, 1986). Las enzimas son esenciales para la fisiología y el metabolismo de las células, ya que aceleran las reacciones químicas, que de lo contrario ocurrirían demasiado lentas. La mayoría de las enzimas alimentarias endógenas permanecen activas durante el procesamiento posterior a la cosecha y con frecuencia causan cambios en los atributos de calidad de los alimentos, como el color, el sabor, la textura y el valor nutricional. La actividad de enzimas endógenas deteriorativas, el crecimiento de microorganismos (con actividad enzimática asociada) y/u otras reacciones no enzimáticas (generalmente

oxidativas) reducen considerablemente la vida de anaquel de los productos hortícolas. Por lo tanto, es necesario el control de la actividad de las enzimas en productos alimenticios, esto se puede lograr mediante la eliminación de sustrato (vg. oxígeno para enzimas oxidativas), inhibición de enzimas (vg. inhibición alostérica con iones específicos) o inactivación de enzimas mediante la aplicación de un estrés externo (vg. temperatura o inactivación química) (Buckow, 2018).

En general, la inactivación enzimática se produce por la alteración de las interacciones responsables de la estructura secundaria (enlaces hidrógeno) y terciaria. Aunque la desnaturalización de las proteínas es causada por el calor, algunas sustancias químicas o la APH también pueden provocar este efecto. La desnaturalización de las proteínas causada por la temperatura y/o la química a menudo provoca el despliegue de las proteínas de manera completa e irreversible, debido a la ruptura de enlaces covalentes y/o la agregación de la molécula. En contraste, la APH puede dejar partes de la molécula sin cambios, lo que indica que los mecanismos de desnaturalización son sustancialmente diferentes (Dietrich Knorr, Heinz, & Buckow, 2006). La APH afecta principalmente la estructura terciaria y cuaternaria de las enzimas; la desnaturalización de la proteína, y por lo tanto, la inactivación de las mismas; por APH se inicia forzando el agua hacia el interior de la matriz proteica; muchos investigadores han sugerido la penetración del agua en la proteína como un requisito previo para el despliegue de la proteína (Nash & Jonas, 1997; Zhang, Peng, Jonas, & Jonas, 1995).

La pérdida del contacto entre grupos no polares de la proteína causa transiciones conformacionales, lo que finalmente provoca el despliegue de algunas partes de la molécula (Saad-Nehme, Silva, & Meyer-Fernandes, 2001). Basak & Ramaswamy (1996) indicaron que la inactivación de la enzima pectinmetilesterasa (PME) en el jugo de naranja sigue un tipo de reacción de fase dual: una caída inicial en su actividad debido al CUT y, posteriormente, una inactivación de la velocidad de primer orden debida al tiempo de mantenimiento de la presión. También, Balny & Masson (1993) sugirieron que el efecto del CUT sobre la estabilidad enzimática es debida al rompimiento instantáneo o

desorientación de su estructura conformacional terciaria o cuaternaria, lo que provoca una reducción de la actividad. No obstante, algunos autores han reportado que algunas enzimas, tales como la PME, se activan a través de algunas condiciones de procesamiento con APH (Liu, Ream, Joerger, Liu, & Wang, 2012). Al respecto, Morales-de la Peña, Salinas-Roca, Escobedo-Avellaneda, Martín-Belloso, & Welte-Chanes (2018) reportaron activación (8–11 %) de la actividad de la enzima PME en puré de mango tratado con 400-500 MPa durante un CUT de 80-86 s (34 °C). El incremento de la actividad enzimática después de la aplicación del CUT podría ser debido a la activación de enzimas latentes (Chakraborty, Kaushik, Rao, & Mishra, 2014), este fenómeno ocurre debido a los cambios conformacionales que provocan la exposición de los polipéptidos extendidos que protegen los sitios activos en su estado latente (Lei, Feng, & Jiang, 2004; Terefe, Yang, Knoerzer, Buckow, & Versteeg, 2010).

2.2.2. Ozono

El ozono ha sido empleado como desinfectante primario para el tratamiento de agua potable y de aguas residuales para la destrucción de microorganismos, este es altamente efectivo y actúa sobre un espectro más amplio de microorganismos que el cloro u otros desinfectantes; además, el uso de desinfectantes químicos, agentes blanqueadores, pesticidas y otros químicos dejan residuos y acumulan químicos tóxicos en los alimentos y el medio ambiente. La elevada reactividad del ozono está asociada con el poder oxidante de los radicales libres (hidroxilos, hidroperóxidos y superóxidos) producidos durante la descomposición del ozono (Manousaridis *et al.*, 2005). Por lo tanto, recientemente, el ozono ha ganado atención de parte de las industrias de alimentos, especialmente para el procesamiento de jugos de frutas, ya que el ozono reacciona más rápido con muchos compuestos orgánicos y no deja residuos en alimentos, debido a que durante el tratamiento el exceso de ozono se descompone rápidamente en oxígeno (Asokapandian *et al.*, 2018).

Con la aprobación (parte de la FDA) del uso del ozono como aditivo que puede ser empleado en contacto directo con los alimentos han emergido algunas

aplicaciones promisorias en alimentos líquidos. Algunos estudios han evaluado el efecto antimicrobiano del ozono en jugo de manzana (Sung, Song, Kim, Ryu, & Kang, 2014), orange juice (Patil *et al.*, 2009), melón (Fundo *et al.*, 2018) y durazno (Garcia, Guerrero, & Alzamora, 2015; Jaramillo-Sánchez *et al.*, 2018). También se ha encontrado que el tratamiento con ozono reduce esporas (Torlak, 2014), degrada micotoxinas (Cataldo, 2008) y consecuentemente, incrementa la vida de anaquel de los jugos (Patil, Valdramidis, Tiwari, Cullen, & Bourke, 2011).

Inactivación microbiológica por ozono

La inactivación microbiana por ozono es un proceso complejo, que involucra la acción del ozono sobre la membrana celular y algunos componentes de la pared celular, debido a que éste afecta los glicolípidos y glicoproteínas (Guzel-Seydim, Greene, & Seydim, 2004) y otros constituyentes celulares, tales como enzimas y ácidos nucleicos. Por lo tanto, la célula posee varios sitios donde el ozono puede reaccionar, lo que conduce a la muerte celular. La inactivación microbiana por ozono (Figura 3) está asociada principalmente con el daño a la superficie celular, lo que provoca la lisis celular (Cho, Kim, Kim, Yoon, & Kim, 2010). Se ha identificado que el ozono ataca los enlaces insaturados de aldehídos, cetonas o carbonilos (Am Water Works Res, 1991); también está involucrado en reacciones electrofílicas, particularmente en compuestos aromáticos, y con reacciones nucleofílicas con algunos de los componentes de las células microbianas (Asokapandian *et al.*, 2018).

Cada microorganismo posee una inherente sensibilidad al ozono; las bacterias son más sensibles que los hongos y las levaduras, las bacterias Gram-positivas son más sensibles al ozono que los microorganismos Gram-negativos, y las esporas son más resistentes que las células vegetativas. Tanto el ozono molecular como los radicales libres producidos por su degradación tienen un rol crucial en el proceso de inactivación microbiana (Cullen, Tiwari, O'Donnell, & Muthukumarappan, 2009; Pascual, Llorca, & Canut, 2007). No obstante, la eficiencia del efecto biocida del ozono depende de algunos factores, tales como: el estado fisiológico (etapa de crecimiento), el pH del medio, temperatura,

humedad, aditivos (vg. Acidos, surfactantes y azúcares) y la cantidad de materia orgánica que rodea las células (Kim & Yousef, 1999).

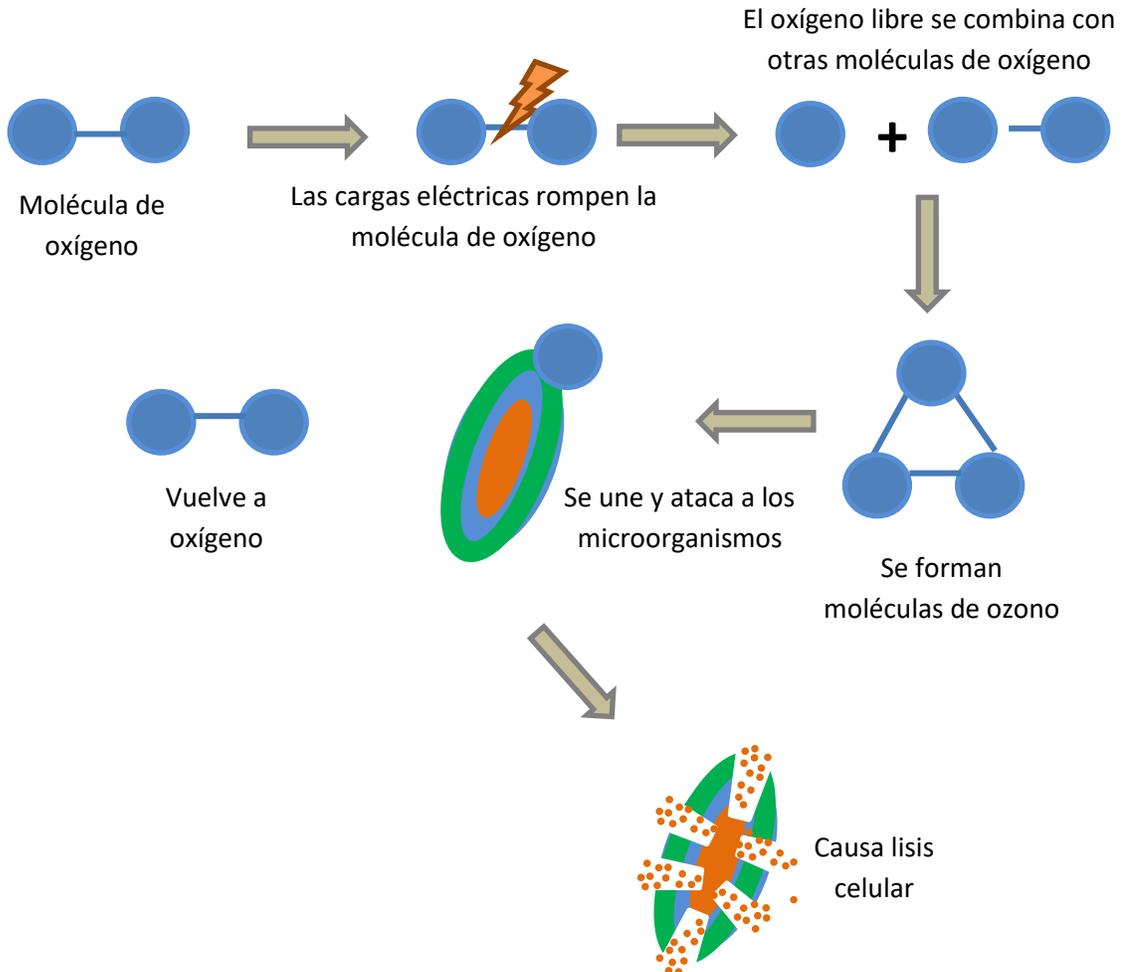


Figura 3. Proceso de inactivación microbiana por ozono. Fuente: elaboración propia con datos de Asokapandian *et al.* (2018).

Garcia *et al.* (2015) investigaron el efecto de la aplicación de 10 y 18 ppm de ozono (12 min) sobre la inactivación de *E. coli*, *L. innocua* y *S. cerevisiae* en jugo de durazno, los autores reportaron reducciones de 4.3 y 4.9 log (UFC mL⁻¹) la población de *E. coli* y *L. innocua* respectivamente; no obstante, la población de *S. cerevisiae* sólo se redujo 1 log (UFC mL⁻¹).

Patil, Valdramidis, Cullen, Frias, & Bourke (2010b) lograron una reducción de 5 log (UFC mL⁻¹) la población de *L. monocytogenes* y *L. innocua* en jugo de naranja tratado con 0.098 mg min⁻¹ mL⁻¹ (5 y 9 min). Por su parte, Patil, Valdramidis,

Cullen, Frias, & Bourke (2010a) informaron que la eficacia del ozono se incrementa con la reducción del pH, estos autores lograron una reducción de 5 log (UFC mL⁻¹) la población de *E. coli* en jugo de manzana (pH = 4) tratado con 0.048 mg de ozono min⁻¹ mL⁻¹ (4 min).

El efecto biocida del ozono también ha sido evaluado en combinación con tratamiento térmico; al respecto, Sung *et al.* (2014) lograron una reducción hasta niveles no detectables la población de *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium* y *L. monocytogenes* en jugo de manzana tratado con ozono (3 L min⁻¹ con una concentración de 2.5 g de ozono m³) y 1 min de tratamiento térmico (25 - 55 °C).

Efecto del ozono sobre compuestos bioactivos

Se ha reportado que el procesamiento con ozono tiene efectos significativos sobre los compuestos bioactivos debido a que éste tiene una fuerte actividad oxidante; el mayor impacto del ozono sobre los compuestos bioactivos se ha observado cuando es aplicado en jugos, que cuando es se aplica en frutos intactos (Tiwari *et al.*, 2013). Por ejemplo, Tiwari, Muthukumarappan, O'Donnell, & Cullen (2008) observaron una reducción de 50 % el contenido de ácido ascórbico en jugo de naranja ozonizado (0.6-10.0 %, 10 min), mientras que Zhang, Lu, Yu, & Gao (2005) reportaron estabilidad de este metabolito en muestras de apio ozonizado (0.18 ppm, 10 min) intacto. También se ha documentado un incremento de los niveles de ácido ascórbico como una respuesta a la exposición al ozono, como ha sido reportado por Luwe, Takahama, & Heber (1993) en espinaca tratada con 0.3 µL⁻¹ de ozono por 6 h y por Pérez, Sanz, Ríos, Olías, & Olías (1999) en fresas tratadas con 0.35 ppm de ozono, a 2 °C por 3 d. En contraste, Alothman, Kaur, Fazilah, Bhat, & Karim (2010) reportaron decrementos en el contenido de ácido ascórbico en piña, plátano y guaya mínimamente procesados y tratados con ozono (8 mL s⁻¹, durante 10 - 30 min); estos autores indican que esta disminución podría estar relacionada con la activación de la enzima ascorbato oxidasa, responsable de la degradación del ácido ascórbico.

Por otro lado, se han observado menores efectos del ozono sobre las antocianinas en fresas tratadas con 0.35 ppm por 3 d (Pérez *et al.*, 1999), y en moras tratadas con 0.3 ppm por 12 d (Barth, Zhou, Mercier, & Payne, 1995). No obstante, el contenido de antocianinas (pelargonidina-3-glucósido y cianidina-3-glucósido) en los jugos de fresa y mora ha sido disminuido (>90.2%) significativamente durante el tratamiento con 7.8 % de ozono por 10 min (Tiwari, O'Donnell, Muthukumarappan, & Cullen, 2009; Tiwari, O'Donnell *et al.*, 2009). También en jugo de melón tratado con ozono (7 g L⁻¹, durante 30 – 60 min) se ha observado la afectación de los compuestos bioactivos (vitamina C, carotenoides) y actividad antioxidante, pero el contenido fenólico ha mostrado incrementos (Fundo *et al.*, 2018). Contrario a lo anterior, en jugo de manzana tratado con ozono (1–4.8 %, 10 min) se han reportado reducciones del contenido de compuestos fenólicos (Torres *et al.*, 2011). Al respecto, el metabolismo fenilpropanoide y la biosíntesis de compuestos fenólicos pueden ser estimulados por el ozono, lo que sugiere que estos metabolitos pueden participar en las respuestas al estrés oxidativo; muchos compuestos fenólicos son eliminadores de especies reactivas de oxígeno (ROS), porque son fácilmente oxidados, y los radicales fenoxilo resultantes presentan menor reactividad que los radicales oxígeno (Booker, Burkey, & Jones, 2012).

Por otro lado, Tzortzakis, Borland, Singleton, & Barnes (2007) reportaron incrementos en el contenido de betacaroteno, luteína y licopeno en tomate almacenado en una atmósfera de ozono (1.0 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 6 d). En general, en las frutas y hortalizas almacenadas en atmósferas de ozono se ha reportado estabilidad de sus compuestos bioactivos (Artés-Hernández, Aguayo, Artés, & Tomás-Barberán, 2007; Barboni, Cannac, & Chiaramonti, 2010).

En conclusión, el efecto del ozono dependerá del tipo de metabolito, nivel de ozonizado aplicado y del alimento tratado (matriz); la degradación es atribuida a la mayor exposición de los compuestos bioactivos al ozono, por tal motivo, los alimentos líquidos son mayormente afectados que los frutos intactos, donde la superficie de contacto con el ozono es limitada.

La degradación de fitoquímicos como ácido ascórbico, antocianinas y compuestos fenólicos durante la aplicación de ozono puede ser debida a la reacción directa con el ozono o con reacciones indirectas de oxidantes secundarios, tales como $\cdot\text{OH}$, $\text{HO}^{2\cdot}$, $\cdot\text{O}_2$ y $\cdot\text{O}_3$; tales oxidantes pueden provocar reacciones nucleofílicas y electrofílicas sobre los compuestos aromáticos que son sustituidos con un electrón donador (vg. OH^-), lo que conlleva a la oxidación del metabolito (Asokapandian *et al.*, 2018). La reacción directa ha sido descrita por el mecanismo de Criegee (Criegee, 1975), donde las moléculas de ozono se ligan a los carbonos con doble enlace C-C, lo que lleva a la formación de ozónidos (1,2,4-trioxolanos), los cuales tienen vida limitada (Criegee, 1975).

Efecto del ozono sobre algunas enzimas

La ligera exposición al ozono induce cambios masivos en la expresión de genes, actividad enzimática y perfiles metabólicos, incluso cuando no se detecta daño tisular (Vainonen & Kangasjärvi, 2015). Al respecto, se ha reportado que la degradación del ácido ascórbico en el caso de frutas y hortalizas enteras o frescas puede deberse a la activación de la enzima ascorbato oxidasa, responsable de la degradación de este metabolito (Alothman *et al.*, 2010). Algunos investigadores han relacionado el efecto del ozono con las respuestas al estrés oxidativo; Sachadyn-Król *et al.* (2016) encontraron que la actividad de la enzima fenilalanina amonio-liasa (PAL) y la tirosina amonioliasa se redujo (25 %) en pimientos tratados con ozono (2 mg L^{-1} , 1-3 h), pero la actividad de las enzimas polifenoloxidasas (PFO) y guaiacol oxidasa (involucradas en la respuesta al estrés oxidativo) se incrementó. Por su parte, Ong, Ali, Alderson, & Forney (2014) reportaron que la actividad de la enzima PAL, peroxidasa (POD) y PFO se incrementó en papaya tratada con ozono ($5 \mu\text{L L}^{-1}$, 96 h).

Rodoni, Casadei, Concellón, Chaves Alicia, & Vicente (2010) informaron que un tratamiento con $10 \mu\text{L}$ de ozono L^{-1} (10 min) en tomate no afectó las enzimas poligalacturonasa y β -galactosidasa; sin embargo, se encontró disminución de la actividad de la enzima pectinmetilesterasa.

Por otro lado, las investigaciones relacionadas con el efecto del ozono sobre la actividad enzimática en jugos son limitadas. Jaramillo-Sánchez *et al.* (2018) analizaron la efectividad del ozono (0.06–2.48 g de ozono L⁻¹) para la inactivación de la actividad de las enzimas PFO y POD en jugo de durazno, es ese trabajo se reportó la disminución (> 97 %) de la actividad de ambas enzimas por el tratamiento con ozono por un periodo de de 12 min.

Con respecto a lo anterior, la hiperreactividad del ozono puede contribuir a la inhibición de varias enzimas causantes del pardeamiento enzimático en jugos, y consecuentemente mantenerlos sensorialmente aceptables.

2.3. Literatura citada

- Alothman, M., Kaur, B., Fazilah, A., Bhat, R., & Karim, A. A. (2010). Ozone-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11, 666–671, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.08.008>.
- Am Water Works Res (1991). *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering*. U.S.: CRC Press.
- Arreola-Nava, H. (1999). Taxonomía del pitayo (*Stenocereus* (Berger) Rice.). In Pimienta-Barrios E. (Ed.), *El Pitayo en Jalisco y Especies Afines en México*. México: Universidad de Guadalajara, Fundación Produce.
- Arreola-Nava, H. J., & Terrazas, T. (2004). *Stenocereus zopilotensis* Arreola-Nava and Terrazas (Cactaceae), a new species from Mexico. *Brittonia*, 56, 96–100, [https://doi.org/10.1663/0007-196X\(2004\)056\[0096:SZAATC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0007-196X(2004)056[0096:SZAATC]2.0.CO;2).
- Artés-Hernández, F., Aguayo, E., Artés, F., & Tomás-Barberán, F. A. (2007). Enriched ozone atmosphere enhances bioactive phenolics in seedless table grapes after prolonged shelf life. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, 824–831. <https://doi.org/10.1002/jsfa>
- Asokapandian, S., Periasamy, S., & Swamy G. (2018). Chapter 25. Ozone for fruit juice preservation. In Rajauria G., & Tiwari B. K. (Eds.), *Fruit juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis*. UK: Elsevier.
- Balny, C., & Masson, P. (1993). Effects of high pressure on proteins. *Food Reviews International*, 9, 611–628, <https://doi.org/10.1080/87559129309540980>.
- Barboni, T., Cannac, M., & Chiaramonti, N. (2010). Effect of cold storage and ozone treatment on physicochemical parameters, soluble sugars and organic acids in *Actinidia deliciosa*. *Food Chemistry*, 121, 946–951, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.024>.
- Bárcenas, P., & Jiménez, V. (2010). Pitayas y Pitahayas (*Stenocereus* spp. e *Hylocereus* spp.), recursos agrícolas en el Valle de Tehuacán Puebla. *Soc. Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 10, 101–119.
- Barrios, I. G. (2013). *Diseño de un Sistema Integral para la Pitaya (Stenocereus griseus)*. México: EAE Editorial Academia Española.
- Barth, M. M., Zhou, C., Mercier, J., & Payne, F. R. A. (1995). Ozone Storage Effects on Anthocyanin Content and Fungal Growth in Blackberries. *Journal of Food Science*, 60(6), 1286–1288. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb04575.x>
- Basak, S., & Ramaswamy, H. S. (1996). Ultra high pressure treatment of orange juice: A kinetic study on inactivation of pectin methyl esterase. *Food Research International*, 29(7), 601–607. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(96\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(96)00068-3)

- Beltrán-Orozco, M. C., Oliva-Coba, T. G., & Gallardo-Velázquez, T. (2005). La pitaya *Stenocereus stellatus*, como alimento funcional. *Industria Alimentaria*, 27, 22–25.
- Beltrán-Orozco, M. C., Oliva-Coba, T. G., Gallardo-Velázquez, T., & Osorio-Revilla, G. (2009). Ascorbic acid, phenolic content, and antioxidant capacity of red, cherry, yellow and white types of pitaya cactus fruit (*Stenocereus stellatus* Riccobono). *Agrociencia*, 43, 153–161. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n2/v43n2a7.pdf>
- Booker, F. L., Burkey, K. O., & Jones, A. M. (2012). Re-evaluating the role of ascorbic acid and phenolic glycosides in ozone scavenging in the leaf apoplast of *Arabidopsis thaliana* L. *Plant, Cell and Environment*, 35(8), 1456–1466. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02502.x>
- Brockington, S. F., Yang, Y., Gandia-Herrero, F., Covshoff, S., Hibberd, J. M., Sage, R. F., ... Smith, S. A. (2015). Lineage-specific gene radiations underlie the evolution of novel betalain pigmentation in Caryophyllales. *New Phytologist*, 207(4), 1170–1180. <https://doi.org/10.1111/nph.13441>
- Buckow, T. and. (2018). High-Pressure Processing Effects on Endogenous Enzymes in Fruits and Vegetables Netsanet. In Houska M., & Marques da Silva F. V. (Eds.), *High Pressure Processing of Fruit and Vegetable Products*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Campos-Rojas, E., Pinedo-Espinoza, J. M., Campos-Montiel, R. G., & Hernández-Fuentes, A. D. (2011). Evaluación de plantas de pitaya (*Stenocereus* spp) de poblaciones naturales de Monte Escobedo, Zacatecas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(3), 173–181.
- Cataldo, F. (2008). Ozone decomposition of patulin - A micotoxin and food contaminant. *Ozone: Science and Engineering*, 30(3), 197–201. <https://doi.org/10.1080/01919510801925930>
- Chakraborty, S., Kaushik, N., Rao, P. S., & Mishra, H. N. (2014). High-pressure inactivation of enzymes: A review on its recent applications on fruit purees and juices. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 578–596. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12071>
- Cho, M., Kim, J., Kim, J. Y., Yoon, J., & Kim, J. H. (2010). Mechanisms of *Escherichia coli* inactivation by several disinfectants. *Water Research*, 44(11), 3410–3418. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.03.017>
- Criegee, R. (1975). Mechanism of Ozonolysis. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 11, 745–752. <https://doi.org/10.1002/anie.197507451>
- Cullen, P. J., Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., & Muthukumarappan, K. (2009). Modelling approaches to ozone processing of liquid foods. *Trends in Food Science & Technology*, 20, 125–136, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.01.049>.
- De Ancos, B., Gonzalez, E., & Cano, M. P. (2000). Effect of high-pressure treatment on the carotenoid composition and the radical scavenging

- activity of persimmon fruit purees. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 3542–3548, <https://doi.org/10.1021/jf990911w>.
- Esquivel, P. (2004). Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía Mesoamericana*, 15, 215–219.
- Esquivel, P., & Araya Quesada, Y. (2012). Características del fruto de la pitahaya (*Hylocereus* sp.) y su potencial de uso en la industria alimentaria. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3, 113–129.
- Esquivel, P., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2007). Comparison of morphological and chemical fruit traits from different pitaya genotypes (*Hylocereus* sp.) grown in Costa Rica. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 81, 7–14.
- Fennema, O. R., & Tannenbaum, S. R. (1996). Introduction to food chemistry. In Fennema R. O., Karel, M., Sanderson G. W., Tannenbaum S. R., Walstra P., & Witaker J. R. (Eds.), *Food Chemistry*. U.S.: Marcel Dek.
- Fundo, J. F., Miller, F. A., Tremarin, A., Garcia, E., Brandão, T. R. S., & Silva, C. L. M. (2018). Quality assessment of Cantaloupe melon juice under ozone processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47, 461–466, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.04.016>.
- García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., & Valle-Guadarrama, S. (2012). Betalains, Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Pitaya De Mayo (*Stenocereus Griseus* H.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35, 1–5, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.108>
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, Chemical, and Antioxidant Activity Characterization of Pitaya (*Stenocereus pruinosus*) Fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68, 403–410, <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0391-8>.
- García-Palazon, A., Suthanthangjai, W., Kajda, P., & Zabetakis, I. (2004). The effects of high hydrostatic pressure on β -glucosidase, peroxidase and polyphenoloxidase in red raspberry (*Rubus idaeus*) and strawberry (*Fragaria x ananassa*). *Food Chemistry*, 88, 7–10, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.019>.
- García-Suárez, F., Carreto-Montoya, L., Cárdenas-Navarro, R., Díaz-Pérez, J. C., & López-Gomez, R. (2007). Pitava (*Stenocereus stellatus*) fruit growth is associated to wet season in Mexican dry tropic. *Phyton*, 76, 19–26.
- García, L. A. B., Guerrero, S. N., & Alzamora, S. M. (2015). Inactivation kinetics and growth dynamics during cold storage of *Escherichia coli* ATCC 11229, *Listeria innocua* ATCC 33090 and *Saccharomyces cerevisiae* KE162 in peach juice using aqueous ozone. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 29, 271–279, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.02.007>.
- Granados, S. D., Mercado, B. A., & López, R. G. (1999). Las pitayas de México. *Ciencia y Desarrollo*, 145, 58–67.

- Grimaldo-Juárez, O., Terrazas, T., García-Velásquez, A., Cruz-Villagas, M., & Ponce-Medina, J. F. (2007). Morphometric Analysis of 21 Pitahaya (*Hylocereus undatus*) Genotypes. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9, 99–117.
- Gross, M., & Jaenicke, R. (1994). Proteins under pressure. The influence of high hydrostatic pressure on structure, function and assembly of proteins and protein complexes. *European Journal of Biochemistry* 221, 617–630, <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1994.tb18774.x>.
- Gudiño, W., & De la Barrera, E. (2014). Fenología reproductiva y tolerancia a temperaturas altas en *Stenocereus queretaroensis*. *Polibotánica*, 37, 63–78.
- Guerrero-Beltrán, J. A., Barbosa-Canovas, G. V., & Welti-Chanes, J. (2011). High hydrostatic pressure effect on natural microflora, *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli*, and *Listeria innocua* in navel orange juice. *International Journal of Food Engineering*, 7, 1–16, <https://doi.org/10.2202/1556-3758.2166>.
- Guerrero-Beltrán, J., Barbosa-Cánovas, G. V., & Welti-Chanes, J. (2011). High hydrostatic pressure effect on *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in pear nectar. *Journal of Food Quality*, 34, 371–378, <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2011.00413.x>.
- Guzel-Seydim, Z. B., Greene, A. K., & Seydim, A. C. (2004). Use of ozone in the food industry. *LWT - Food Science and Technology*, 37, 453–460, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.014>.
- Hauben, K. J., Bartlett, D. H., Soontjens, C. C., Cornelis, K., Wuytack, E. Y., & Michiels, C. W. (1997). *Escherichia coli* mutants resistant to inactivation by high hydrostatic pressure. *Applied and Environmental Microbiology*, 63, 945–950.
- Heremans, K. (1995). High pressure effects on biomolecules. *High Pressure Processing of Foods*, 81–97.
- Hoover, D. G. (1989). Biological effects of high hydrostatic pressure on food microorganisms. *Food Technology*, 43, 99–107.
- Houska, M., & Marques da Silva, F. V. (2018). 1. Introduction to High-Pressure Processing of Fruit and Vegetable Products. In Houska M., & Marques da Silva F. V. (Eds.), *High Pressure Processing of Fruit and Vegetable Products*. U.S.: CRC Press.
- Hsu, K. C., Tan, F. J., & Chi, H. Y. (2008). Evaluation of microbial inactivation and physicochemical properties of pressurized tomato juice during refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 367–375, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.03.030>.
- Huang, H. W., Lung, H. M., Yang, B. B., & Wang, C. Y. (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. *Food Control*, 40, 250–259, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.12.007>.

- Hunt, D., Taylor, N., & Charles, G. (2006). *The new cactus lexicon: descriptions and illustrations of the cactus family*. England: David Hunt Books.
- Jaramillo-Sánchez, G. M., Garcia, L. A., Gómez, P. L., & Alzamora, S. M. (2018). Ozone processing of peach juice: impact on physicochemical parameters, color, and viscosity. *Ozone: Science & Engineering*, 40, 305–312, <https://doi.org/10.1080/01919512.2017.1417111>.
- Jaramillo, S. G. M., Garcia, L. A. B., Contigiani, E. V., Gómez, P. L., & Alzamora, M. A. (2017). Inactivation kinetics of peroxidase and polyphenol oxidase in peach juice treated with gaseous ozone. *International Journal of Food Science and Technology*, 2017, 1–9, <https://doi.org/10.1111/ijfs.13591>.
- Kähkönen, M. P., Hopia, A. I., & Heinonen, M. (2001). Berry phenolics and their antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 4076–4082, <https://doi.org/10.1021/jf010152t>.
- Kanellis, A. K., Manganaris, G. A., Nath, P., Bouzayen, M., Mattoo, A. K., & Pech, J. C. (2014). 7 Antioxidants and bioactive compounds in fruits. In Nath, P., Bouzayen M., Mattoo A. K., & Peach J. C. (Eds.), *Fruit Ripening: Physiology, Signalling and Genomics* (pp. 99–126). UK: CAB International.
- Khan, M. I., & Giridhar, P. (2015). Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*, 117, 267–295, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.06.008>.
- Kim, J., & Yousef, A. E. (1999). Application of Ozone for Enhancing the Microbiological Safety and Quality of Foods: A Review. *Journal of Food Protection*, 62, 1071–1087, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-62.9.1071>.
- Knorr, D. (1999). Novel approaches in food-processing technology: new technologies for preserving foods and modifying function. *Current Opinion in Biotechnology*, 10, 485–491, [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(99)00015-4).
- Knorr, D., Heinz, V., & Buckow, R. (2006). High pressure application for food biopolymers. *Biochimica et Biophysica Acta - Proteins and Proteomics*, 1764, 619–631, <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2006.01.017>.
- Kuti, J. O. (2004). Antioxidant compounds from four Opuntia cactus pear fruit varieties. *Food Chemistry*, 85, 527–533. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00184-5).
- Lado, B. H., & Yousef, A. E. (2002). Alternative food-preservation technologies: Efficacy and mechanisms. *Microbes and Infection*, 4, 433–440, [https://doi.org/10.1016/S1286-4579\(02\)01557-5](https://doi.org/10.1016/S1286-4579(02)01557-5).
- Le Bellec, F., Vaillant, F., & Imbert, E. (2006). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a new fruit crop, a market with a future. *Fruits*, 61, 237–250, <https://doi.org/10.1051/fruits:2006021>.
- Lei, D., Feng, Y., & Jiang, D. (2004). Characterization of polyphenol oxidase from plants. *Progress in Natural Science*, 14, 553–561,

10.1080/10020070412331343941.

- Liaotrakoon, W., de Clercq, N., van Hoed, V., van de Walle, D., Lewille, B., & Dewettinck, K. (2013). Impact of Thermal Treatment on Physicochemical, Antioxidative and Rheological Properties of White-Flesh and Red-Flesh Dragon Fruit (*Hylocereus* spp.) Purees. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 416–430, <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0722-4>.
- Liu, Y., Ream, A., Joerger, R. D., Liu, J., & Wang, Y. (2011). Gene expression profiling of a pressure-tolerant *Listeria monocytogenes* Scott A ctsR deletion mutant. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38, 1523–1533, <https://doi.org/10.1007/s10295-011-0940-9>.
- Livrea, M. A., & Tesoriere, L. (2006). Health Benefits and Bioactive Components of the Fruits. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 8, 73–90.
- López, G. R., Díaz, P. J. C., & Flores, M. G. (2000). Vegetative propagation of three species of cacti: Pitaya (*Stenocereus Griseus*), Tunillo (*Stenocereus Stellatus*) and Jiotilla (*Escontria Chiotilla*). *Agrociencia*, 34, 363-367.
- López, M. C. R., García, M. R., Gallegos, V. C., & Sahagún, C. J. (2015). Antioxidant components and nutritional quality of 15 genotypes of Xoconostle (*Opuntia* spp.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 17, 33–49.
- Luna-Morales, C. del C. (2004). Recolección, cultivo y domesticación de cactáceas columnares en la Mixteca Baja, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 10, 95–102.
- Luwe, M., Takahama, U., & Heber, U. (1993). Role of Ascorbate in Detoxifying Ozone in the Apoplast of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Leaves. *Plant Physiology*, 101, 969–976, <https://doi.org/10.1104/pp.101.3.969>.
- Manousaridis, G., Nerantzaki, A., Paleologos, E. K., Tsiotsias, A., Savvaidis, I. N., & Kontominas, M. G. (2005). Effect of ozone on microbial, chemical and sensory attributes of shucked mussels. *Food Microbiology*, 22, 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.06.003>.
- Mercado, J., & Granados, D. (2002). *La pitaya. Biología, Ecología, Fisiología Sistemática, Etnobotánica*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Mozhaev, V. V., Heremans, K., Frank, J., Masson, P., & Balny, C. (1994). Exploiting the effects of high hydrostatic pressure in biotechnological applications. *Trends in Biotechnology*, 12, 493–501, [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0167-7799(94)90057-4).
- Mozhaev, V. V., Heremans, K., Frank, J., Masson, P., & Balny, C. (1996). High pressure effects on protein structure and function. *Proteins*, 24, 81–91, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0134\(199601\)24:1<81::AID-PROT6>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0134(199601)24:1<81::AID-PROT6>3.0.CO;2-R)
- Nash, D. P., & Jonas, J. (1997). Structure of Pressure-Assisted Cold Denatured

Lysozyme and Comparison with Lysozyme Folding Intermediates Structure of Pressure-Assisted Cold Denatured Lysozyme and Comparison with. *Solutions*, 2960, 14375–14383, <https://doi.org/10.1021/bi970881v>.

- Niakousari, M., Gahrue, H. H., Razmjooei, M., Roohinejad, S., & Greiner, R. (2018). Effects of Innovative Processing Technologies on Microbial Targets Based on Food Categories: Comparing Traditional and Emerging Technologies for Food Preservation. In Barba F. J., Sant'Ana A. S., Orlie V., & Koubaa M. (Eds.), *Innovative Tecnologies for Food Peservation*. UK: Academic Press.
- Novoa, A., Le Roux, J. J., Robertson, M. P., Wilson, J. R. U., & Richardson, D. M. (2015). Introduced and invasive cactus species: A global review. *AoB PLANTS*, 7, 1–14, <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu078>.
- Ochoa-Velasco, C. E., & Guerrero-Beltrán, J. Á. (2012). Ultraviolet-C Light Effect on Pitaya (*Stenocereus griseus*) Juice. *Journal of Food Research*, 1, 60–70, <https://doi.org/10.5539/jfr.v1n2p60>.
- Ogawa, H., Fukuhisa, K., Kubo, Y., & Fukumoto, H. (1990). Pressure inactivation of yeasts, molds, and pectinesterase in satsuma mandarin juice: Effects of juice concentration, ph, and organic acids, and comparison with heat sanitation. *Agricultural and Biological Chemistry*, 54, 1219–1225, <https://doi.org/10.1080/00021369.1990.10870118>.
- Ong, M. K., Ali, A., Alderson, P. G., & Forney, C. F. (2014). Effect of different concentrations of ozone on physiological changes associated to gas exchange, fruit ripening, fruit surface quality and defence-related enzymes levels in papaya fruit during ambient storage. *Scientia Horticulturae*, 179, 163–169, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.004>.
- Ortiz, H. Y. (1999). *Colección de Textos Politécnicos: Pitahaya un Nuevo Cultivo para México*. México: IPN-Editorial Limusa.
- Pascual, A., Llorca, I., & Canut, A. (2007). Use of ozone in food industries for reducing the environmental impact of cleaning and disinfection activities. *Trends in Food Science and Technology*, 18, 29–35, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.10.006>.
- Patil, S., Bourke, P., Frias, J. M., Tiwari, B. K., & Cullen, P. J. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* in orange juice using ozone. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10, 551–557, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.05.011>.
- Patil, S., Torres, B., Tiwari, B. K., Wijngaard, H. H., Bourke, P., Cullen, P. J., ... Valdramidis, V. P. (2010). Safety and quality assessment during the ozonation of cloudy apple juice. *Journal of Food Science*, 75, 437–443, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01750.x>.
- Patil, S., Valdramidis, V. P., Cullen, P. J., Frias, J., & Bourke, P. (2010a). Inactivation of *Escherichia coli* by ozone treatment of apple juice at different

- pH levels. *Food Microbiology*, 27, 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.05.002>.
- Patil, S., Valdramidis, V. P., Cullen, P. J., Frias, J. M., & Bourke, P. (2010b). Ozone inactivation of acid stressed *Listeria monocytogenes* and *Listeria innocua* in orange juice using a bubble column. *Food Control*, 21, 1723–1730, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.04.031>.
- Patil, S., Valdramidis, V. P., Tiwari, B. K., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2011). Quantitative assessment of the shelf life of ozonated apple juice. *European Food Research and Technology*, 232, 469–477, <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1416-2>.
- Patras, A., Brunton, N., Da Pieve, S., Butler, F., & Downey, G. (2009). Effect of thermal and high pressure processing on antioxidant activity and instrumental colour of tomato and carrot purées. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10, 16–22, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.09.008>.
- Pérez-Loredo, M. G., García-Ochoa, F., & Barragán-Huerta, B. E. (2016). Comparative Analysis of Betalain Content in *Stenocereus Stellatus* Fruits and Other Cactus Fruits Using Principal Component Analysis. *International Journal of Food Properties*, 19, 326–338, <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1022259>.
- Pérez, A. G., Sanz, C., Ríos, J. J., Olías, R., & Olías, J. M. (1999). Effects of ozone treatment on postharvest strawberry quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 1652–1656, <https://doi.org/10.1021/jf980829l>.
- Pimienta-Barrios, E., & Nobel, P. S. (1995). Reproductive Characteristics of Pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) and their Relationships with Soluble Sugars and Irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120, 1082–1086, <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.6.1082>.
- Quiroz-González, B., García-Mateos, M. del R., Corrales-García, J., & Colinas-León, M. T. B. (2018). Pitaya (*Stenocereus* spp.): an under-utilized fruit. *Journal of the Profesional Association for Cactus Development*, 20, 82–100.
- Ramírez-Ramos, M., García-Mateos, M. del R., Corrales-García, J., Ybarra-Moncada, C., & Castillo-González, A. M. (2015). Compuestos antioxidantes en variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38, 349–357.
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre R., J. R., & Valiente-Banuet, A. (2006). Reproductive biology of *Opuntia*: A review. *Journal of Arid Environments*, 64, 549–585. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.06.018>.
- Rivera, G., Bocanegra-García, V., & Monge, A. (2010). Traditional plants as source of functional foods: a review Plantas tradicionales como fuente de alimentos funcionales: una revisión. *CYTA - Journal of Food*, 8, 159–167, <https://doi.org/10.1080/19476330903322978>.

- Rodoni, L., Casadei, N., Concellón, A., Chaves Alicia, A. R., & Vicente, A. R. (2010). Effect of short-Term ozone treatments on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit quality and cell wall degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 594–599, <https://doi.org/10.1021/jf9029145>.
- Rosales- Bustamante, P., Luna-Morales, C. del C., & Cruz-León, A. (2009). Clasificación y selección tradicional de pitaya (*Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxb.) en Tianguistengo, Oaxaca y variación morfológica de cultivares. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15, 75–82.
- Saad-Nehme, J., Silva, J. L., & Meyer-Fernandes, J. R. (2001). Osmolytes protect mitochondrial F0F1-ATPase complex against pressure inactivation. *Biochimica et Biophysica Acta - Protein Structure and Molecular Enzymology*, 1546, 164–170, [https://doi.org/10.1016/S0167-4838\(01\)00137-6](https://doi.org/10.1016/S0167-4838(01)00137-6).
- Sachadyn-Król, M., Materska, M., Chilczuk, B., Karaś, M., Jakubczyk, A., Perucka, I., & Jackowska, I. (2016). Ozone-induced changes in the content of bioactive compounds and enzyme activity during storage of pepper fruits. *Food Chemistry*, 211, 59–67, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.023>.
- SIAP. (2017). *Cierre de la Producción Agrícola*. Consultada en: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/identidad/index.jsp
- Sumaya-Martínez, M. T., Suárez, D. T., Cruz, C. N. del S., Alanís, G. E., & Sampedro, J. G. (2010). Innovation of high added value products using Mexican prickly pears. *Quinta Epoca*, 27, 435–441.
- Sung, H., Song, W., Kim, K., Ryu, S., & Kang, D. (2014). International Journal of Food Microbiology Combination effect of ozone and heat treatments for the inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella Typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* in apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 171, 147–153, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.001>.
- Taylor, P., & Rivera, G. (2010). Traditional plants as source of functional foods: a review. *CyTA - Journal of Food*, 8, 159-167, <https://doi.org/10.1080/19476330903322978>.
- Terefe, N. S., Buckow, R., & Versteeg, C. (2014). Quality-Related Enzymes in Fruit and Vegetable Products: Effects of Novel Food Processing Technologies, Part 1: High-Pressure Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54, 24–63, <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.566946>.
- Terefe, N. S., Yang, Y. H., Knoerzer, K., Buckow, R., & Versteeg, C. (2010). High pressure and thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in strawberry puree. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11, 52–60, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.08.009>.

- Terrazas, T., Loza-Cornejo, S., & Arreola-Nava, H. J. (2005). Stem anatomy of the species of the genus *Stenocereus* (Cactaceae). *Acta Botánica Venezolánica*, 28, 321–336.
- Tiwari, B. K., Cullen, P., Brennan, C. S., & O'Donnell, C. P. (2013). Non thermal processing. In Tiwari B. K., Brunton N. P., & Brennan C. S. (Eds.), *Handbook of Plant Food Phytochemicals*. UK: Wiley-Blackwell.
- Tiwari, B. K., Muthukumarappan, K., O'Donnell, C. P., & Cullen, P. J. (2008). Kinetics of freshly squeezed orange juice quality changes during ozone processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 6416–6422, <https://doi.org/10.1021/jf800515e>.
- Tiwari, B. K., O'donnell, C. P., & Cullen, P. J. (2009). Effect of non thermal processing technologies on the anthocyanin content of fruit juices. *Trends in Food Science & Technology*, 20, 137–145, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.01.058>.
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., Muthukumarappan, K., & Cullen, P. J. (2009). Anthocyanin and colour degradation in ozone treated blackberry juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10, 70–75, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.08.002>.
- Torlak, E. (2014). Efficacy of ozone against *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 172, 1–4, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.035>.
- Torres, B., Tiwari, B. K., Patras, A., Wijngaard, H. H., Brunton, N., Cullen, P. J., & O'Donnell, C. P. (2011). Effect of ozone processing on the colour, rheological properties and phenolic content of apple juice. *Food Chemistry*, 124, 721–726, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.050>.
- Tsou, C. L. (1986). Location of the active sites of some enzymes in limited and flexible molecular regions. *Trends in Biochemical Sciences*, 11, 427–429, [https://doi.org/10.1016/0968-0004\(86\)90178-7](https://doi.org/10.1016/0968-0004(86)90178-7).
- Tzortzakis, N., Borland, A., Singleton, I., & Barnes, J. (2007). Impact of atmospheric ozone-enrichment on quality-related attributes of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 45, 317–325, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.03.004>.
- Vainonen, J. P., & Kangasjärvi, J. (2015). Plant signalling in acute ozone exposure. *Plant, Cell and Environment*, 38, 240–252, <https://doi.org/10.1111/pce.12273>.
- Westphal, A., Schwarzenbolz, U., & Böhm, V. (2018). Effects of high pressure processing on bioactive compounds in spinach and rosehip puree. *European Food Research and Technology*, 244, 395–407, <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2964-5>.
- Xu, X., Deng, J., Luo, D., Bao, Y., Liao, X., Gao, H., & Wu, J. (2018). Comparative study of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of clear and cloudy Se-enriched kiwifruit juices.

Innovative Food Science and Emerging Technologies, 49, 1–12,
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.010>.

- Yahia, E. M., & Mondragon-jacobo, C. (2011). Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *FRIN*, 44, 2311–2318,
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.042>.
- Zhang, J., Peng, X., Jonas, A., & Jonas, J. (1995). NMR Study of the Cold, Heat, and Pressure Unfolding of Ribonuclease A. *Biochemistry*, 34, 8631–8641,
<https://doi.org/10.1021/bi00027a012>.
- Zhang, L., Lu, Z., Yu, Z., & Gao, X. (2005). Preservation of fresh-cut celery by treatment of ozonated water. *Food Control*, 16, 279–283,
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.03.007>
- Zrýd, J. P., & Christinet, L. (2004). Betalains. In Davies K. (Ed.), *Plant Pigment and Their Manipulation*. U.S.: CRC-Press.

3. PITAYA (*Stenocereus* spp.): UN FRUTO SUBUTILIZADO

3.1. Resumen

Pitaya (*Stenocereus* spp.) es un fruto exótico consumido desde tiempos ancestrales por culturas prehispánicas. Recientemente en México, esta cactácea ha sido motivo de atención comercial por el agradable sabor que tienen sus frutos succulentos, de pulpa jugosa y dulce de gran variedad de coloraciones (blancas, amarillas, moradas y rojas); posee excelentes atributos sensoriales, nutricionales, nutraceuticos, y usos agroindustriales y medicinales promisorios; no obstante, es un fruto subutilizado. Los elevados contenidos de betalaínas en el fruto permiten considerar a estas variedades una fuente de pigmentos naturales para su uso en la industria alimentaria. El objetivo de la presente contribución es proporcionar una descripción de la importancia del género *Stenocereus*, con la finalidad de promover su estudio, difusión, producción, consumo y aprovechamiento agroindustrial. Se presenta una descripción botánica, distribución, cultivo, fisiología, aspectos pre y poscosecha, composición nutricional y nutraceutica y usos agroindustriales y medicinales de este género. Debido a sus ventajas agronómicas, nutraceuticas y agroindustriales, la producción de este fruto representa una oportunidad para el desarrollo económico de algunas zonas áridas y semiáridas de México. Se recomienda realizar estudios principalmente en los aspectos fisiológicos, nutraceuticos, medicinales y agroindustriales, en particular en las especies no estudiadas del género *Stenocereus*, y las investigaciones futuras deberían ocuparse del desarrollo de tecnologías agrícolas para garantizar la obtención de elevados rendimientos de productos de excelente calidad, lo cual permita la obtención de beneficios económicos para los agricultores.

Palabras clave: *Stenocereus*, cactácea, antioxidantes, exótica, uso agroindustrial.

Tesis de Doctorado en Ciencias, en Ciencias Agroalimentarias, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Beatriz Quiroz González
Director de Tesis: Dra. María del Rosario García Mateos

Artículo publicado en la Journal of the Professional Association for Cactus Development (2018), 20, 82-100.

3.2. Introducción

El pitayo es una cactácea columnar que pertenece al género *Stenocereus* (Bravo y Sánchez-Mejorada, 1991). El nombre deriva de las palabras griegas: "στενός" (*stenos*) para "apretado, estrecho", se refiere a las costillas estrechas de las plantas y *cereus* para "cirio, vela". Se han reportado de 22 a 24 especies comestibles de este género en América (Terrazas *et al.*, 2005; Rosales-Bustamante *et al.*, 2009), de las cuales 20 son endémicas de México (Arreola, 1999; Bárcenas y Jiménez, 2010). Por lo tanto, México podría ser considerado el centro de origen, por ser el país con la mayor y más importante diversidad de cactáceas (Esquivel, 2004; Reyes-Agüero *et al.*, 2006; Novoa *et al.*, 2015).

Recientemente, esta cactácea ha sido motivo de atención comercial por el agradable sabor que tienen sus frutos succulentos, de pulpa jugosa y dulce de gran variedad de coloraciones (blancas, amarillas, moradas y rojas) (Campos-Rojas *et al.*, 2011; García-Cruz *et al.*, 2012). Sin embargo, no se ha explorado su aprovechamiento comercial, posiblemente por ser un fruto de un cultivo regional, perecedero, y por el desconocimiento de sus propiedades nutricionales y nutraceuticas de la mayoría de las especies (Pimienta-Barrios y Nobel, 1998; Treviño *et al.*, 2012). Por lo tanto, este fruto representa un prometedor potencial comercial a nivel nacional e internacional (García-Suárez *et al.*, 2007; Campos-Rojas *et al.*, 2011) principalmente por sus propiedades antioxidantes (Campos-Rojas *et al.*, 2011; García-Cruz *et al.*, 2013; Pérez-Loredo *et al.*, 2016). Asimismo, existen limitados estudios sobre pitaya, por lo que se dificulta la identificación del estado del arte desde el punto de vista hortícola. Por lo anterior, en el presente trabajo se realiza una compilación de la información disponible relacionada con este fruto exótico.

3.3. Descripción botánica

Existen pocos estudios taxonómicos y filogenéticos sobre el género *Stenocereus*. De acuerdo con Mercado y Granados (2002) el pitayo pertenece al Orden: *Caryophyllales*; Familia: *Cactaceae* y Tribu: *Pachycereae*). En América Latina, los frutos de los géneros *Stenocereus*, *Cereus*, *Selenicereus* y *Hylocereus* se

denominan “pitahaya”, un nombre genérico y vernáculo (Hunt *et al.*, 2006; Le Bellec *et al.*, 2006). Sin embargo, “Pitaya” y “pitahaya” se han utilizado como sinónimos de manera incorrecta (Hunt *et al.*, 2006; Le Bellec *et al.*, 2006); “pitaya” corresponde a los frutos del género *Stenocereus* (Ortiz, 1999; García Suárez *et al.*, 2007) mientras que “pitahaya” al género *Hylocereus* (Ortiz, 1999); la pitaya es descrita y discutida en la presente contribución. Esta cactácea se caracteriza por ser una planta arborescente con troncos definidos y ramificaciones desde la base, tallos jóvenes y ramas provistas de 4 a 20 ó más costillas; las flores se ubican entre las aréolas y las espinas (Buxbaum, 1961; Pimienta-Barrios y Nobel, 1994). Sus frutos (pitayas) son bayas poliespermáticas pigmentadas de forma globosa u ovoide, un pericarpio provisto de aréolas que llevan espinas (Buxbaum, 1961; Pimienta-Barrios y Nobel, 1994; Arnaud, 1997), similares a pequeñas agujas que le brindan protección natural (Figura 4). La pulpa es jugosa, posee un delicado sabor dulce, contiene semillas negras, triangulares, pequeñas (1 mm) y suaves, las cuales se digieren fácilmente (Pimienta-Barrios y Nobel, 1994; Arnaud, 1997; Luna-Morales y Aguirre, 2001), contrario a lo que ocurre con los frutos de otras cactáceas como la tuna (*Opuntia* spp.) (Pimienta-Barrios y Nobel, 1994).



Figura 4. A) árbol y B) flores del pitayo, C) espinas y D) pulpa de la pitaya (*Stenocereus pruinosus*).

Existe una diversidad de especies del género *Stenocereus* (Cuadro 1), así como variación en sus características morfológicas. El peso del fruto varía entre especies e incluso entre variantes (Cuadro 2). En algunas especies se han reportado frutos con un peso mayor a 400 g (Corrales, 2002.). También los pesos de la pulpa y de la cáscara (epidermis) muestran variaciones entre especies; la cáscara en *S. griseus* es más delgada que en los frutos de *S. pruinosus*. Se ha observado frutos de mayor peso (30 %) en especies domesticadas de *S. stellatus*

que en las especies silvestres (Rodríguez-Morales *et al.*, 2013). Consecuentemente, las últimas, aun no aprovechadas, podrían representar un potencial comercial. El mayor grosor de cáscara, así como la magnitud de sus espinas proporciona mayor resistencia a daños físicos, características que determinan su resistencia al manejo poscosecha (Campos-Rojas *et al.*, 2011).

Cuadro 1. Especies de *Stenocereus* (pitayos) endémicas de México.

Especie	Distribución	Endémica	Cultivo	Referencias
<i>S. alamosensis</i>	México	+	--	Terrazas <i>et al.</i> , 2005; Arreola-Nava, 1999
<i>S. beneckeii</i>	México	+	--	Arreola-Nava, 1999
<i>S. chacalapensis</i>	México	+	--	Terrazas <i>et al.</i> , 2005; Arreola-Nava, 1999
<i>S. chrysocarpus</i>	México	+	--	Arias y Terrazas, 2006; Yetman, 2007; Arreola-Nava, 1999
<i>S. dumortieri</i>	México	+	R	Luna-Morales y Aguirre, 2001; Luna-Morales, 2004; Arias <i>et al.</i> , 2013; Martínez-Falcón <i>et al.</i> , 2011; Arreola-Nava, 1999
<i>S. eruca</i>	México	+	--	Hernández y Godínez, 1994; Arreola-Nava, 1999
<i>S. fricci</i>	México	+	R	Arias y Terrazas, 2006; Arreola-Nava, 1999
<i>S. griseus</i>	México, Colombia, Venezuela y Sudamérica	--	C/R	Corrales, 2002; Arreola-Nava, 1999; SIB Portal de Datos, 2015; Padrón, 2012; Fuentes <i>et al.</i> , 2011.
<i>S. gummosus</i>	México	+	-	Esquivel, 2004; Arreola-Nava, 1999
<i>S. montanus</i>	México	+	S	Arreola-Nava, 1999
<i>S. pruinosus</i>	México	+	C/S	Flores <i>et al.</i> , 2011; Arellanes <i>et al.</i> , 2013; Arreola-Nava, 1999
<i>S. queretaroensis</i>	México	+	C/S	Gallardo-Vásquez y De la Barrera, 2007; Gudiño y De la Barrera, 2014; Arreola-Nava, 1999
<i>S. stellatus</i>	México	+	C	Luna-Morales y Aguirre, 2001; Flores <i>et al.</i> , 2011; Arellanes, 2013; Arreola-Nava, 1999
<i>S. thurberi</i>	México, Arizona	-	S	Esquivel, 2004; Parker, 1989; Arreola-Nava, 1999
<i>S. treleasei</i>	México	+	S	Granados <i>et al.</i> , 1999; Arreola-Nava, 1999
<i>S. eichlamii</i>	México, Guatemala, El Salvador	--	--	Arias y Terrazas, 2006; Arias <i>et al.</i> , 2003
<i>S. martinezii</i>	México	+	--	Vega-Aviña <i>et al.</i> , 2000
<i>S. quevedonis</i>	México	--	S	Gudiño y De la Barrera, 2014; Granados <i>et al.</i> , 1999
<i>S. zopilotesensis</i>	México	--	--	Arreola-Nava y Terrazas, 2004
<i>S. standleyi</i>	México	--	--	Segura <i>et al.</i> , 2009

C= especie cultivada; R= especie recolectada; S= especie silvestre.

Cuadro 2. Peso de frutos de algunas especies de pitaya (*Stenocereus* spp.) de mayor comercialización.

Especie y/o color	Peso (g)			Referencias
	Pulpa	Cáscara	Total	
<i>S. pruinosus</i> (rojo y anaranjado)	129-131	48-50	177.0-180.9	García-Cruz <i>et al.</i> , 2013.
<i>S. pruinosus</i> (31 variantes)	79-333	15- 69	86 - 399	Luna-Morales, 2006
<i>S. stellatus</i> (blanco, rojo, amarillo y morado)	-	-	76-101	Pérez-Loredo <i>et al.</i> , 2016
<i>S. griseus</i> (17 variantes)	-	-	100 - 290	Martínez-González y Cruz-Hernández (1995)
<i>S. griseus</i> (blanco y rojo)	44	18-22	63-69	Emaldi <i>et al.</i> , 2006

3.4. Distribución

El pitayo se ubica en bosques tropicales caducifolios (Pimienta-Barrios y Nobel, 1994), principalmente en las zonas áridas y semiáridas del sur de Arizona, E.U.A. (Parker, 1989) hasta algunas regiones de América Latina (Granados *et al.*, 1999; García-Cruz *et al.*, 2012) como Honduras, El Salvador (Arias y Terrazas, 2006) Colombia y Venezuela (Anderson, 2001; Terrazas *et al.*, 2005). México es el principal productor, la producción del fruto se desarrolla principalmente en cuatro regiones del país en Mixteca Oaxaca-Puebla, Michoacán, Sinaloa-Sonora y Jalisco-Zacatecas (Castro-Alvarez *et al.*, 2015).

3.5. Cultivo

Desde el punto de vista fisiológico, el cultivo de este fruto durante su desarrollo requiere poco riego, fertilizantes y plaguicidas (Pimienta-Barrios y Nobel, 1994). Es tolerante a las temperaturas elevadas (Drennan, 2009; Gudiño y De la Barrera, 2014), en particular la especie *S. queretaroensis* (Gudiño y De la Barrera, 2014). La cosecha de pitaya inicia desde los meses de abril hasta octubre, aunque se ha reportado su cosecha hasta noviembre y diciembre en otras regiones (Flores, 2003).

3.6. Importancia económica

En la última década en México se ha incrementado más de diez veces la producción de pitaya hasta alcanzar una producción de 4 500 t. Cabe destacar que esta producción es 160 veces menor que la de tuna (*Opuntia* spp.), pero es más rentable porque el valor de la producción de la pitaya es 32 veces menor

menor (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2017) que el valor de la producción de tuna. A pesar de ser un fruto de estacionalidad limitada (Ochoa-Velazco y Guerrero-Beltrán, 2012), este cultivo podría otorgar beneficios significativos a los agricultores, debido a la baja demanda de agua que requiere (Barrios, 2013). Adicionalmente, el cultivo de esos frutos podría considerarse una alternativa del aprovechamiento de los recursos fitogenéticos. El estudio agronómico podría mejorar su manejo y comercialización con la intención de darle un valor agregado.

De las especies que se localizan en México, *S. queretaroensis* (Pimienta-Barrios y Nobel, 1995; Granados *et al.*, 1999; García-Suárez *et al.*, 2007), *S. stellatus*, *S. griseus*, *S. pruinosus* (Granados *et al.*, 1999; García-Suárez *et al.*, 2007), *S. treleasei*, *S. fricci* y *S. quevedonis* comprenden las de mayor aprovechamiento comercial (Granados *et al.*, 1999). La especie *S. queretaroensis* (Gudiño y De la Barrera, 2014) es la de consumo más extendido en el país. Los frutos de las especies *S. griseus* (pitaya de mayo) y *S. stellatus* (pitaya agria) se cultivan principalmente en la región Mixteca de Oaxaca, los cuales son las especies más importantes para la economía de muchas comunidades rurales de algunas zonas semiáridas de México (López *et al.*, 2000). Las especies restantes se cultivan en huertos de traspatio y otras sólo se obtienen mediante recolección (Luna-Morales, 2004; Arreola-Nava, 1999; Granados *et al.*, 1999) para autoconsumo y/o comercialización local (García-Suárez *et al.*, 2007).

3.7. Fisiología de la pitaya

Las cactáceas al ser plantas con metabolismo Ácido Crasuláceo (CAM) absorben el CO₂ principalmente por la noche. Este comportamiento favorece su desarrollo en ambientes áridos (Pimienta-Barrios *et al.*, 1997; Hernández-López *et al.*, 2008) porque pierden menor cantidad de agua (Pimienta-Barrios *et al.*, 1997) que las especies con apertura de estomas durante el día (plantas con metabolismo C₃ y C₄). Las plantas CAM tendrán una importancia especial cuando el calentamiento global cause sequía y eficiencia en el uso del agua. Durante el almacenamiento, el patrón de respiración corresponde a frutos no climatéricos (Rodríguez-Irepan

et al., 2011; García-Cruz *et al.*, 2016) con un decremento de la tasa de respiración (10 a 4 mg CO₂·kg·hr) con un comportamiento asintótico (Kays, 1991; Armella, 2003). El etileno es una hormona que juega un papel central en la maduración de los frutos climatéricos; sin embargo, se ha identificado el gen de la enzima ACC oxidasa (enzima que participa en la síntesis de etileno) en pitaya *S. stellatus* durante la maduración (Rodríguez-Irepan *et al.*, 2011). El papel del etileno o de la ACC oxidasa en frutos no climatéricos aún es desconocido (Barry y Giovannoni, 2007), aunque éstos podrían participar en el proceso de maduración o en respuesta a un proceso de senescencia de la pitaya (Barry y Giovannoni, 2007; Rodríguez-Irepan *et al.*, 2011).

Otro aspecto relevante en la fisiología de la pitaya es la tolerancia a la sal; porque, en el ambiente donde crecen las pitayas, la salinidad es una condición común. Orozco *et al.* (2017) señalaron que las semillas de pitaya son más tolerantes a la concentración de sal que las semillas de otras cactáceas columnares. Además, el aumento del estrés salino provoca un aumento en los pigmentos fotosintéticos (clorofilas y carotenoides), lo que sugiere la formación de compuestos de osmolitos que ayudan en la protección de las células vegetales sometidas a bajos potenciales de agua causados por el estrés salino (Orozco *et al.*, 2017).

3.8. Aspectos pre y poscosecha

En función de la variedad de pitaya, su maduración se caracteriza por el cambio del color de la epidermis de un color verde brillante a uno verde amarillento. El color de la epidermis y la dureza de las espinas son empleados como índices de cosecha, aunque depende de la subjetividad del cosechador o de los requisitos del comprador (Armella, 2003). Algunos parámetros de calidad comprenden el contenido de sólidos solubles totales, tal que a 13 °Bx, el fruto está listo para su cosecha (Arnaud *et al.*, 1997; Armella 2003). Asimismo, se ha propuesto que la acidez está relacionada con la madurez, por lo que también se emplea como índice de cosecha o calidad (Pérez-Loredo *et al.*, 2016). Stintzing *et al.* (2003) sugirió que una relación azúcar: acidez entre 10:1 y 18:1 es un indicativo de buen sabor y aceptabilidad de una fruta.

La vida corta del fruto es la principal limitante para su comercialización (Esquivel, 2004; Rodríguez-Irepan *et al.*, 2011) ya que en un estado de madurez avanzado presentan dehiscencia longitudinal (Pimienta-Barrios y Nobel, 1994; Rodríguez-Irepan *et al.*, 2011). Otro aspecto que limita la comercialización del fruto es la presencia de largas espinas que brindan protección natural al fruto durante el transporte, pero característica indeseable para el consumidor (Armella, 2003). Después de remover sus espinas, la vida poscosecha del fruto disminuye, debido a la epidermis delgada, delicada es susceptible al daño por abrasión, son frutos más sensibles a problemas de agrietamiento y daños poscosecha (Nerd *et al.*, 1999; Campos-Rojas *et al.*, 2011). Estas características deben ser el objetivo de los esfuerzos de mejoramiento para disminuir estas dificultades.

La vida de anaquel de la pitaya, a temperatura ambiente es de 3 a 6 d (Ochoa-Velasco y Guerrero-Beltrán, 2012; García-Cruz *et al.*, 2016) aunque la presencia de las espinas en el fruto prolonga la vida de anaquel en refrigeración (Arnaud *et al.*, 1997; Armella, 2003). Para atender la problemática poscosecha, la refrigeración ha permitido la prolongación de la vida de anaquel hasta 20 d (Arnaud *et al.*, 1997; Armella, 2003). Después de 20 d de almacenamiento refrigerado, los frutos no tienen una apariencia atractiva, pero aún conservan un buen sabor y pulpa dulce, por lo tanto, se sugiere que con estos frutos se preparen mermeladas, jugos, néctares, pulpa deshidratada y pulpa congelada (Arnaud *et al.*, 1997; Armella, 2003). No existe información respecto a pérdidas poscosecha debido a desórdenes fisiológicos, pudriciones, almacenamiento, daños por frío, por lo que se recomienda proponer tecnologías emergentes para aprovechamiento agroindustrial del fruto. Se han aplicado algunas tecnologías emergentes para la conservación de jugo de pitaya, como la exposición a radiación UV, altas presiones hidrostáticas y ozonizado con resultados importantes para el manejo agroindustrial (Ochoa-Velasco y Guerrero-Beltrán, 2012; Ochoa-Velasco y Guerrero-Beltrán, 2013; Sandate-Flores, 2017).

3.9. Calidad nutricional

El contenido de fibra, la cual presenta efectos contra diabetes, obesidad y cáncer de colon (Yangilar, 2013), varía de acuerdo con la especie. *S. pruinosus* presenta concentraciones de fibra semejantes a las reportadas en xoconostle (0.3 - 1.04 %) (Guzmán-Maldonado *et al.*, 2010; López *et al.*, 2015); pero es mayor a la fibra contenida en pitahaya de pulpa blanca (*Hylocereus undatus*) (0.45 %) (Liaotrakoon *et al.*, 2013). La pulpa de los frutos de pitaya se caracteriza por su bajo contenido de proteína (1.08 - 1.51 %) (Cuadro 3); sin embargo, en las semillas la concentración es mayor (8.1 - 9.2 %) (Campos-Rojas *et al.*, 2011; Pimienta-Barrios y Nobel *et al.*, 1994), por lo tanto, el consumo integral de pitaya representa una alternativa de la ingesta de proteína a bajo costo en comparación a otros frutos, debido a sus semillas digeribles. El contenido de proteína en pulpa es similar (aproximadamente 1 %) al encontrado en tuna (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2005), pero mayor al reportado en xoconostle (0.60 - 0.87 %) (Hernández-Fuentes *et al.*, 2015) y en pitahaya (*Hylocereus polyhizus*) (0.27 %) (Jaafar *et al.*, 2009). El contenido de lípidos es similar al reportado en xoconostle (0.10 - 0.50 %) (Contreras *et al.*, 2011; Hernández-Fuentes *et al.*, 2015) y en tuna (0.40 %) (Chiteva y Wairagu, 2013; Moreno *et al.*, 2008). Este fruto se caracteriza por los contenidos elevados contenidos de vitamina B, C y E (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009), en particular la vitamina C (0.85 a 1.7 %) se presenta en concentraciones similares a la documentada en xoconostle “Cuaresmeño” (0.76 - 1 %), pero mayor a la encontrada en tuna (0 - 0.52 %) (Chiteva y Wairagu, 2013) y en pitahaya (0.26 - 0.58 %) (Esquivel *et al.*, 2007).

La pitaya es un fruto con un elevado contenido de azúcares (Bravo y Scheinvar, 1998; Luna-Morales, 2006) y sólidos solubles totales (SST), características afectadas por diversos factores, tales como especies, variedades, distribución geográfica y pigmentación (Cuadro 3). Las variedades de *S. pruinosus* han mostrado valores mayores de SST (García-Cruz *et al.*, 2013) que los frutos de *S. stellatus* independientemente de su color (Pérez-Loredo *et al.*, 2016). La pitaya es un fruto más dulce (9.3 - 17.5 °Bx) en comparación a otros frutos de cactáceas, como xoconostle de las especies *Opuntia matudae*, *O. duranguensis*, *O.*

joconostle, *O. ezontepecana*, *O. oligacantha* y *O. scheinveriana* (4.28 - 6.12 °Bx) (Hernández-Fuentes *et al.*, 2015), pero es similar (7.5 - 12.92 °Bx) al dulzor de la pitahaya (*Hylocereus* sp.) (Esquivel *et al.*, 2007) y tuna de *O. ficus-indica* con 13.9 °Bx (Fernández-López *et al.*, 2018).

Cuadro 3. Composición química de la pulpa de frutos de algunas especies de pitaya (*Stenocereus* spp.).

Especie y/o color	<i>S. pruinosus</i> (roja y anaranjada)	<i>S. stellatus</i> (blanca, amarilla, morada y roja)	<i>S. stellatus</i> (roja, cereza, amarilla y blanca)	<i>S. queretaroensis</i>	<i>S. griseus</i>
Fibra cruda (%)	0.53-0.67	1.39-1.63	--	--	3.29
Proteína (% base seca)	1.20-1.30	1.08-1.30	1.00 ^y	1.51	1.29
Lípidos (%)	0.10-0.12	0.39-0.49	3.0 ^x	--	0.12
Carbohidratos o azúcares totales (%)	8.50-10.20	9.65-10.85	11.7 ^y	5.6 ± 0.8	--
Azúcares reductores (%)	--	4.33-6.46	8.86-9.91	3.4 ± 0.4	8.60
° Bx	9.30-10.30	9.53-9.63	9.33-9.67	10.7 ± 0.8	--
Ac. málico (%)	0.13-0.17	0.48-0.81	--	0.15-0.50 ^w	--
pH	5.7-5.8 ^z	3.37-3.64	4.09-4.3	4.5 ± 0.3	4.96-5.20
Cenizas (%)	0.61-0.63	0.48-0.58	0.48 ^y	--	0.46
Humedad (%)	87.1-89.00	85.39-86.50	86.3 ^y	--	--
Referencia	García-Cruz <i>et al.</i> , 2013; García-Cruz <i>et al.</i> , 2016 ^z	Pérez-Loredo <i>et al.</i> , 2016	Beltrán-Orozco <i>et al.</i> , 2009; Mercado y Granados, 2002 ^y ; Caballero <i>et al.</i> , 2016 ^x .	Pimienta-Barrios y Nobel, 1995; ^w Pimienta-Barrios y Nobel, 1994	Mercado y Granados, 2002

Otro componente, derivado del metabolismo CAM (Lüttge, 2004), es la presencia de ácido málico, responsable de la acidez en los frutos de cactáceas. La pitaya contiene menor concentración de ácido málico (0.13 -0.81 %) que la pitahaya (1.044 %) (Obenland *et al.*, 2016) y que el xoconostle (6 %) (Morales *et al.*, 2012; Morales *et al.*, 2015), pero similar o mayor que la tuna (0.18 %) (Palma *et al.*, 2015). Cabe destacar que las pitayas rojas de *S. pruinosus* presentan valores más elevados de ácido málico que las variedades anaranjadas (García-Cruz *et*

al., 2013), en contraste las blancas de *S. stellatus* presentan mayor contenido que las de *S. pruinosus* (Pérez-Loredo *et al.*, 2016). Por lo que el contenido de ácido málico varía en función de la especie y no de la pigmentación del fruto (Cuadro 3). Al respecto, los frutos de mayor aceptación sensorial presentan una relación azúcar: acidez de 10:1 y de 18:1 (Stintzing *et al.*, 2003). El pH encontrado en pitaya es mayor (3.37 – 5.8) en comparación al reportado en xoconostle (2.8 - 3.2) (Guzmán-Maldonado *et al.*, 2010; Contreras *et al.*, 2011) que es más ácido, pero similar al reportado para pitahaya (*Hylocereus* sp.) (4.26 - 4.98) (Esquivel *et al.*, 2007; Liaotrakoon *et al.*, 2013), lo que también favorece las preferencias del consumidor.

El hierro es el principal mineral en pitaya al estar presente aproximadamente 40 % seguido del cobre y zinc (19.4 y 12.7 %, respectivamente); en particular, para la especie *S. pruinosus* (Cuadro 4) se encontró que el contenido de hierro es mayor en los frutos de color anaranjado que en los rojos (García-Cruz *et al.*, 2013). El calcio es el mineral que se encuentra en menor concentración; no obstante, juega un papel crucial en la retención de agua de los tejidos suculentos (Stintzing y Carle, 2005).

Cuadro 4. Composición y contenido (mg kg⁻¹) mineral en frutos de pitaya (*Stenocereus pruinosus*) de las variantes roja y anaranjada.

Variantes	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
Roja	3.6	1.1	0.90	2.35	22.8	9.67	7.04	4.61
Naranja	3.4	1.2	0.95	2.15	27.9	14.31	8.77	4.34

Fuente: García-Cruz *et al.*, 2013.

3.10. Calidad nutracéutica

Los ingredientes nutracéuticos productos del metabolismo secundario, presentes en los vegetales proporcionan beneficios para la salud, incluyendo la prevención y el tratamiento de enfermedades (Wildman y Kelley, 2007); ayudan a prevenir algunos problemas de salud del siglo como obesidad, trastornos cardiovasculares (Badimon *et al.*, 2010; Das *et al.*, 2012), cáncer, osteoporosis artritis, diabetes, colesterol, etc. (Das *et al.*, 2012).

Las betalaínas se encuentran entre los nutraceuticos restringidos, principalmente en las familias del orden *Caryophyllales* (Esquivel y Araya-Quesada, 2012; Khan y Giridhar, 2015; Brockington *et al.*, 2015). Estos pigmentos son los responsables del color rojo y amarillo de la pulpa y de la cáscara de pitaya, tuna, xoconostle y pitahaya (García-cruz *et al.*, 2013; Yahia y Mondragon-Jacobo, 2011; López *et al.*, 2015; Liaotrakoon *et al.*, 2013). Estos metabolitos se derivan biosintéticamente del ácido betalámico y se agrupan en betacianinas y betaxantinas; las primeras, son responsables de las coloraciones rojo-púrpura y las betaxantinas de los colores amarillo-anaranjado (Zrýd y Christinet, 2004; Stintzing y Carle, 2007). Estos compuestos ayudan en la prevención de cáncer; evitan la oxidación de lípidos de las membranas debido a sus propiedades antioxidantes (Livrea y Tesoriere, 2006); no presentan efectos tóxicos en humanos como algunos pigmentos sintéticos (Sumaya-Martínez *et al.*, 2010); también se usan en la industria de alimentos (Rivera *et al.*, 2010; Bárcenas y Jiménez, 2010) y cosmética (Bárcenas y Jiménez, 2010).

La variación de la intensidad del color rojo de la pulpa de pitaya es debido a la alta proporción de betacianinas en comparación con betaxantinas (Yáñez-López *et al.*, 2005), como se ha reportado en los frutos rojos de *S. stellatus* y en los amarillos de *S. pruinosus* (Cuadro 5) (Pérez-Loredo *et al.*, 2016). En general, la pulpa de pitaya presenta concentraciones mayores de betalaínas, (hasta 6 mg g⁻¹ ps de acuerdo con García-Cruz *et al.*, 2016) que otras cactáceas como la tuna (3.28 mg g⁻¹ ps) (Ramírez-Ramos *et al.*, 2015), xoconostle (0.2- 3.15mg⁻¹ g ps) (Guzmán-Maldonado *et al.*, 2010; López *et al.*, 2015) y pitahaya, con sólo 0.17 mg g⁻¹ (ps) de betacianinas (Liaotrakoon *et al.*, 2013).

Cuadro 5. Concentración de nutraceuticos y actividad antioxidante en la pulpa de algunas especies de pitaya (*Stenocereus* spp.).

Propiedades	<i>S. pruinosus</i>		<i>S. griseus</i>		<i>S. stellatus</i>	
	Roja	Naranja	Roja	Naranja	Blanca	Roja
Betaxantinas (mg·g ⁻¹ bs ²)	2.6	2.3	1.48	1.77	Nd ^x	1.5
Betacianinas (mg·g ⁻¹ bs)	2.5	0.3	2.00	0.37	Nd	1.5
Fenoles totales (mg GAE· g ⁻¹ bs)	13.6	10.56	1.67	0.53	4.47	5.79
Actividad antioxidante (ABTS) (μmol TE · g ⁻¹ bh ^y)	1100	750	--	--	790.5	673.7
Referencias	(García-Cruz <i>et al.</i> , 2013)		(García-Cruz <i>et al.</i> , 2012)		(Pérez-Loredo <i>et al.</i> , 2016)	

²bs: base seca; ^ybh: base húmeda; ^xNd: No detectado.

Los compuestos fenólicos, debido a su diversidad y amplia distribución son el grupo más importante de metabolitos antioxidantes naturales. Existen evidencias epidemiológicas que muestran los beneficios en la salud y su contribución en la prevención de algunas enfermedades degenerativas (Soto-Hernández *et al.* 20017a; b). Estos metabolitos son compuestos con la habilidad quelar metales pesados, modular algunas enzimas y neutralizar radicales libres (especies reactivas del oxígeno producidos por el estrés oxidativo en el organismo afectando lipoproteínas, lípidos y otras biomoléculas) (Delgado-Vargas y Paredez-López, 2003; Georgé *et al.*, 2005).

Los compuestos fenólicos se acumulan principalmente en la cáscara en comparación con la pulpa de pitaya (Kanellis *et al.*, 2014), así como en tuna y xoconostle (Ramírez-Ramos *et al.*, 2015; López *et al.*, 2015). La concentración mayor de compuestos fenólicos en *S. stellatus* se ha identificado en pitayas de pulpa roja en comparación con de las de pulpa anaranjada y blanca (García-Cruz *et al.*, 2013; García-Cruz *et al.*, 2012; Pérez-Loredo *et al.*, 2016); aunque, la actividad antioxidante es mayor en las variedades blancas (Pérez-Loredo *et al.*, 2016) debido a un efecto sinérgico de éstos metabolitos y las betalainas, como se ha reportado en tuna (Albano *et al.*, 2015; Ramírez-Ramos *et al.*, 2015) y en xoconostle (Lopez *et al.*, 2015). Azeredo (2009) señala que las betacianinas son

antioxidantes más potentes que las betaxantinas, lo que explica la mayor actividad antioxidante reportada en la pitaya roja de *S. pruinosa* (García-Cruz *et al.*, 2013).

Algunos autores reportan que el ácido ascórbico es también una fuente importante de antioxidantes en algunos frutos, particularmente en pitaya (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009), en tuna (Kuti, 2004; Ramírez-Ramos *et al.*, 2015) y xoconostle (Lopez *et al.*, 2015). De acuerdo con lo anterior, las variedades de pitaya amarilla y blanca presentan mayores concentraciones de ácido ascórbico, por lo tanto, muestran una mayor actividad antioxidante que las variedades rojas que contienen concentraciones menores (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009). Al respecto, se ha propuesto que el consumo de 100 g de pulpa de pitaya cubre el 21 % de la recomendación de la ingesta diaria (60 mg d⁻¹) para adultos (Beltrán-Orozco *et al.*, 2005).

Al respecto, se ha documentado que el consumo de pitayas, principalmente de las variedades amarillas y blancas proveen una protección contra los radicales libres similar (17 µmol g⁻¹ equivalente a Trolox g⁻¹) al valor más bajo reportado por las bayas azules del género *Vaccinium* (16.8 -17.3 µmol·g⁻¹ equivalente a Trolox g⁻¹) (Beltrán-Orozco *et al.*, 2009; Kähkönen *et al.*, 2001).

Otro tipo de metabolitos presentes en los frutos de pitaya son los compuestos volátiles. Se han identificado aldehídos y alcoholes en algunas pitayas (*S. griseus*) de las variedades “Amarilla”, “Jarra”, “Melón”, “Solferino”, “Olla” y “Smooth red”, los cuales producen los aromas herbáceos, y los ésteres, los cuales producen los aromas afrutados. Entre los ésteres identificados se encuentran el hexanoato de metilo, hexanoato de etilo, acetato de etilo y butirato de etilo; mientras que el pentanal, pentanol, hexanal y 2-nonenal y trans-2-hexanal fueron detectados entre los aldehídos y alcoholes. El aroma fresco agradable y herbáceo se debe a la presencia del 1-hexanol y el hexanal, mientras que el *flavor* (sabor-olor) afrutado en los frutos se debe a la presencia del butirato de etilo y acetato de etilo. Se han encontrado diferencias en las concentraciones de los compuestos volátiles entre variedades del género *S. griseus*, éstas son

mayores en la variedad “Jarra” que en “Olla”; sin embargo, estas variedades representan un potencial comercial (Yáñez-López *et al.*, 2005) porque estos atributos favorecen las preferencias del consumidor.

3.11. Usos agroindustriales

El fruto de pitaya por sus propiedades organolépticas (color, sabor y aroma) se consume como fruta de mesa y se usa para elaborar aguas frescas, helados, mermeladas (Martínez *et al.*, 2011; Campos-Rojas *et al.*, 2011), gelatinas (Martínez *et al.*, 2011), paletas (Luna-Morales y Aguirre, 2001) y licores (Martínez *et al.*, 2011; Luna-Morales y Aguirre, 2001). Se produce mermelada de las variedades blanca y roja de *S. griseus*, pero la de mayor aceptación sensorial y estabilidad fue la elaborada con la variedad roja porque no se alteran los atributos de color, sabor y consistencia al término de tres meses (Emaldi *et al.*, 2006). Recientemente, se ha propuesto la elaboración artesanal de refrescos, jarabes, ates y ensaladas de pulpa congelada (Vázquez *et al.*, 2009). Tradicionalmente, se han empleado las semillas de *S. pruinosa* mezcladas con maíz para la elaboración de tortillas (Luna-Morales y Aguirre, 2001). En los procesos de industrialización se aprovechan los polisacáridos (pectinas) de la pulpa y de la cáscara del fruto (Bárcenas y Jiménez, 2010; Vázquez *et al.*, 2009). Otras alternativas de conservación de los jugos elaborados con la especie *S. griseus*, son los tratados con luz UV y almacenados hasta 25 d sin la afectación de pH, SST y compuestos fenólicos, pero con un ligero cambio total de color por la reducción significativa de betalaínas y actividad antioxidante, además de la reducción de mesófilos aerobios y levaduras (Ochoa-Velasco y Guerrero, 2013). Por lo que el uso de la luz UV para el tratamiento de jugo de pitaya podría ser una alternativa factible para producir jugos microbiológicamente seguros para el consumidor (Ochoa-Velasco y Guerrero-Beltrán, 2012). El jugo de pitaya también se ha mezclado con piña y tratado con altas presiones hidrostáticas (400–600 MPa and 25 °C for 2–10 min). Las altas presiones podrían ser una buena opción para la retención de los compuestos antioxidantes en una bebida de pitaya–piña (Sandate-Flores *et al.*, 2017). Las características que presenta el fruto de pitaya tratado lo convierten en una opción promisorio para su aprovechamiento

industrial; particularmente la especie *S. pruinosus* declarada como potencialmente industrial y nutracéutica por sus características de peso, diámetro (polar y ecuatorial), fracción comestible, y por su elevado contenido de carbohidratos, hierro, fenoles, betalaínas y actividad antioxidante (García-Cruz *et al.*, 2013).

3.12. Usos medicinales

La información de las propiedades medicinales del fruto es limitada en comparación con otras partes de la planta de pitayo. La planta completa de *S. pruinosus* es una alternativa para la formulación de nuevos fármacos antifúngicos (Treviño *et al.*, 2012). La parte aérea de *S. marginatus* (potencialmente ornamental) se ha empleado en infusiones para el tratamiento de diarrea (Hernández *et al.*, 2003) y sin procesar para el tratamiento de diabetes *mellitus* tipo 2 (Romero-Cerecero *et al.*, 2009). La parte aérea y la flor de la especie *S. thurberi* se usan para el tratamiento de picaduras de algunos insectos (abejas, raya, víbora y *Scorpaena* sp.), de cáncer de útero, presión arterial, problemas cardiacos (Dimayuga *et al.*, 1998a), heridas y úlceras (Dimayuga *et al.*, 1998b). El tallo cocido en vapor es usado para el tratamiento de diabetes *mellitus* (Andrade-Cetto y Heinrich, 2005). Asimismo, se ha declarado el potencial medicinal del extracto de los tallos por contener flavonas, lactonas sesquiterpénicas y alcaloides con actividad contra *Helicobacter pylori* (Moreno *et al.*, 2015). Los tallos y hojas de *S. gummus* se utilizan en el tratamiento de la presión sanguínea, mordeduras de víboras venenosas y mantarrayas, y para el control del colesterol y parásitos (Dimayuga *et al.*, 1998a; Dimayuga *et al.*, 1998b). También se ha reportado su actividad antimicrobiana contra *Bacillus subtilis* y *Streptococcus faecalis* (Dimayuga *et al.*, 1998b). La raíz de *S. stellatus* se emplea en infusiones para el tratamiento de afecciones gastrointestinales (Hernández *et al.*, 2005; Hernández *et al.*, 2003).

3.13. Conclusiones

La pitaya es parte de la identidad cultural de México, pero adolece de un potencial poco reconocido y de la subutilización comercial. Sin embargo, debido a su

contenido nutricional y propiedades nutraceuticas, esta representa una gran oportunidad para el desarrollo de nuevos productos agroindustriales. La presencia de betalainas en pitaya, la sitúa como materia prima factible para la elaboración de alimentos nutraceuticos por sus propiedades antioxidantes. Debido a la información limitada, se sugiere el desarrollo de investigaciones orientadas al manejo agronómico, fisiológico en precosecha, así como el estudio de la calidad nutricional. También la identificación de mejores fenotipos de pitaya con importancia comercial para el aumento de la demanda y la creación de nuevas oportunidades de comercialización. Estas frutas tienen un gran potencial como fruto del futuro debido a su alta eficiencia en el uso del agua por su metabolismo fotosintético CAM.

3.14. Literatura citada

- Albano, C., Negro, C., Tommasi, N., Gerardi, C., Mita, G., Miceli, A., ... & Blando, F. (2015). Betalains, phenols and antioxidant capacity in cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] fruits from Apulia (South Italy) genotypes. *Antioxidants*, 4, 269-280, <https://doi.org/10.3390/antiox4020269>.
- Anderson, E. F. (2001). *The Cactus family*. U.S.: Timber Press.
- Andrade-Cetto, A. & Heinrich, M. (2005). Mexican plants with hypoglycaemic effect used in the treatment of diabetes. *Journal of Ethnopharmacology*, 99, 325-348, <https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.04.019>.
- Arellanes, Y., Casas, A., Arellanes, A., Vega, E., Blancas, J., Vallejo, M., Torres, I., Rangel-Landa, S., Moreno, A.I., Solís, L. and Pérez-Negrón, E. (2013). Influence of traditional markets on plant management in the Tehuacán Valley. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 9, 1-15, <https://doi.org/10.1186/1746-4269-9-38>.
- Arias, S., Arreola, H., Bárcenas, L. R., Cházaro, M., Guadalupe, M. J., Sánchez, E. & Terrazas, T. (2013). *Stenocereus dumortieri*. *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2015.2*. Consultada en www.iucnredlist.org
- Arias, S. & Terrazas, T. (2006). Análisis cladístico del género *Pachycereus* (Cactaceae) con caracteres morfológicos. *Brittonia*, 58, 197-216, [https://doi.org/10.1663/0007-196X\(2006\)58\[197:ACDGPC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0007-196X(2006)58[197:ACDGPC]2.0.CO;2).
- Arias, S., Terrazas, T. & Cameron, K. (2003). Phylogenetic analysis of *Pachycereus* (Cactaceae, Pachycereeae) based on chloroplast and nuclear DNA sequences. *Systematic Botany*, 28, 547-557.
- Armella, M. A., Yáñez-López, L., Soriano, J. & Ramírez, G. (2003). Phenology, postharvest physiology and marketing of pitaya (*Stenocereus griseus* L.)

- as a sustainable resource. *Acta Horticulturae*, 598, 251-254, 10.17660/ActaHortic.2003.598.37.
- Arnaud, V. R., Santiago, G. P. & Bautista, P. B. (1997). Agroindustria de algunos frutos. In Rodríguez P.L. (Ed.), *Suculentas Mexicanas Cactáceas*. México: CVS Publishers.
- Arreola-Nava, H. J. & Terrazas, T. (2004). *Stenocereus zopilotensis* Arreola-Nava and Terrazas (Cactaceae), a new species from Mexico. *Brittonia*, 56, 96-100, [https://doi.org/10.1663/0007-96X\(2004\)056\[0096:SZAATC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0007-96X(2004)056[0096:SZAATC]2.0.CO;2).
- Arreola-Nava, H. (1999). Taxonomía del pitayo (*Stenocereus* (Berger) Rice.). In Pimienta-Barrios E. (Ed.), *El Pitayo en Jalisco y Especies Afines en México*. México: Universidad de Guadalajara, Fundación Produce.
- Azeredo, H. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability—a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 2365-2376, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>.
- Badimon, L., Vilahur, G. & Padro, T. (2010). Nutraceuticals and atherosclerosis: human trials. *Cardiovascular Therapeutics*, 28, 202-215, <https://doi.org/10.1111/j.1755-5922.2010.00189.x>.
- Bárceñas, A. P. & Jiménez, C. V. (2010). Pitayas y pitahayas (*Stenocereus* spp. e *Hylocereus* spp.), recursos agrícolas en el Valle de Tehuacán Puebla. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 10, 101-119.
- Barrios, I. G. (2013). *Diseño de un Sistema Integral para la Pitaya (Stenocereus griseus): Almacenamiento, Transporte y Exhibición*. México: EAE Editorial Academia Española.
- Barry, C. S. & Giovannoni, J. J. (2007). Ethylene and fruit ripening. *Journal of Plant Growth Regulation*, 26, 143-159, <https://doi.org/10.1007/s00344-007-9002-y>.
- Beltrán-Orozco, M. C., Oliva-Coba, T. G. & Gallardo-Velázquez, T. (2005). La pitaya *Stenocereus stellatus*, como alimento funcional. *Industria Alimentaria*, 27, 22-25.
- Beltrán-Orozco, M. C., Oliva-Coba, T. G., Gallardo-Velázquez, T. & Osorio-Revilla, G. (2009). Ascorbic acid, phenolic content and antioxidant capacity red, cherry, yellow and white types of pitahaya cactus fruit (*Stenocereus stellatus* Riccobono). *Agrociencia*, 43, 153-162.
- Bravo, H. H. & Sánchez-Mejorada, H. (1991). *Las Cactáceas de México* (3ª ed.). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bravo, H. H. & Scheinvar, L. (1998). Donde crecen las cactáceas. In Retif A. (Ed.), *El Interesante Mundo de las Cactáceas*. México: CONACYT y Fondo de Cultura Económica.
- Brockington, S. F., Yang, Y., Gandia-Herrero, F., Covshoff, S., Hibberd, J. M., Sage, R. F., ... & Smith, S. A. (2015). Lineage-specific gene radiations

- underlie the evolution of novel betalain pigmentation in Caryophyllales. *New Phytologist*, 4, 1170-1180, <https://doi.org/10.1111/nph.13441>.
- Buxbaum, F. (1961). Die entwicklungslinien der tribes Pachycereeeae F. Buxb. (Cactaceae-Cereoideae). *Botanical Studies*, 12, 1–107.
- Caballero, B., Finglas, P. & Toldrá, F. (2016). *Encyclopedia of Food and Health*. Amsterdam: Elsevier.
- Campos-Rojas, E., Pinedo-Espinoza, J. M., Campos-Montiel, R.G. & Hernández-Fuentes, A.D. (2011). Evaluación de plantas de pitaya (*Stenocereus* spp) de poblaciones naturales de Monte Escobedo, Zacatecas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17, 173-182.
- Castro-Álvarez, A., Sandate-Flores, L. & Parra-Saldivar, R. (2015). Cultivation of *Stenocereus* spp. as an option to reduce crop loss problems in high marginalization states in Mexico. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 9, 5.
- Chiteva, R. & Wairagu, N. (2013). Chemical and nutritional content of *Opuntia ficus-indica* (L.). *African Journal of Biotechnology*, 12, 3309-3312, 10.5897/AJB12.2631.
- Contreras, L. E., Jaimez, O. J., Castañeda, O. A., Añorve, M. J. & Villanueva, R. S. (2011). Sensory profile and chemical composition of *Opuntia joconostle* from Hidalgo, Mexico. *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 2, 37-39.
- Corrales, G. J. (2002). *Caracterización, poscosecha, aprovechamiento e industrialización de pitayas y pitahayas. Reporte de investigación 65*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Das, L., Bhaumik, E., Raychaudhuri, U. & Chakraborty, R. (2012). Role of nutraceuticals in human health. *Journal of Food Science and Technology*, 49, 173-183, <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0269-4>.
- Delgado-Vargas F. & Paredes-López, O. (2002). *Natural Colorants for Food and Nutraceutical Uses*. U.S.: CRC Press.
- Dimayuga, R. E., Altamirano, L. & Maki, K. A. 1998a. Screening of medicinal plants from Baja California Sur (Mexico) by their effects on smooth muscle contractility. *Pharmaceutical Biology*, 36, 124-130, <https://doi.org/10.1076/phbi.36.2.124.4606>.
- Dimayuga, R. E., Virgen, M. & Ochoa, N. (1998b). Antimicrobial activity of medicinal plants from Baja California Sur (Mexico). *Pharmaceutical Biology*, 36, 33-43, <https://doi.org/10.1076/phbi.36.1.33.4625>.
- Drennan, P. M. (2009). Temperature influences on plant species of arid and semi-arid regions with emphasis on crassulacean acid metabolism (CAM) succulents. In De la Barrera E., & Smith W.K. (Eds.), *Perspectives in Biophysical Plant Ecophysiology*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Emaldi, U., Nassar, J. M. & Semprum, C. (2006). Pulpa del fruto del cardón dato (*Stenocereus griseus*, Cactaceae) como materia prima para la elaboración de mermelada. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 56, 83-89.
- Esquivel, P. (2004). Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía Mesoamericana*, 15, 215-219.
- Esquivel, P. & Araya-Quesada, Y. (2012). Características del fruto de la pitahaya (*Hylocereus* sp.) y su potencial de uso en la industria alimentaria. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos* 3, 113-129.
- Esquivel, P., Stintzing F. C. & Carle, R. (2007). Comparison of morphological and chemical fruit traits from different pitaya genotypes (*Hylocereus* sp.) grown in Costa Rica. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 81, 7-14.
- Fernández-López, J. A., Roca, M. J., Angosto, J. M. & Obón, J. M. (2018). Betaxanthin-rich extract from cactus pear fruits as yellow water-soluble colorant with potential application in foods. *Plant Foods for Human Nutrition*, 73, 146-153, <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0664-3>.
- Flores, M. Y. N., Reyna, T. J., Cervantes, R. M. C. & Luna, M. C. C. (2011). Distribución geográfica y potencial de *Stenocereus pruinosus* y *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) en la Mixteca Poblana, México. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 56, 4-20.
- Flores, V. C. A. (2003). *Pitayas y Pitahayas: Producción, Poscosecha, Industrialización y Comercialización*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Fuentes, L., Mendoza, I., López A., Castro, M. & Urdaneta, C. (2011). Effectiveness of a coagulant extracted from *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb in water purification. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 34, 48-56.
- Gallardo-Vásquez, J. C. & De la Barrera, E. (2007). Environmental and ontogenetic influences on growth, photosynthesis, and survival for young pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) seedling. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9, 118-135.
- García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y. & Valle-Guadarrama, S. (2012). Betalains, phenolic compounds and antioxidant activity in pitaya de mayo (*Stenocereus griseus* H.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35, 1-5.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y. & del Carmen, Luna-Morales, C. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69-76, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.004>.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y. & Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, chemical, and antioxidant activity characterization of Pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68, 403-410. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0391-8>.

- García-Suárez, F., Carreto-Montoya, L., Cárdenas-Navarro, R., Díaz-Pérez, J. C. & López-Gómez, R. (2007). Pitaya (*Stenocereus stellatus*) fruit growth is associated to wet season in Mexican dry tropic. *Phyton*, 76, 19-26.
- Georgé, S., Brat, P., Alter, P. & Amiot-Carlín, M. J. (2005). Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plants derived products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 1370-1373, 10.1021/jf048396b.
- Granados, S. D., Mercado, B.A. & Ríos, F.L. (1999). Las Pitayas de México. *Ciencia y Desarrollo*, 145, 58-67.
- Grimaldo-Juárez, O., Terrazas, T., García-Velásquez, A., Cruz-Villagas, M. & Ponce-Medina, J. F. (2007). Morphometric analysis of 21 Pitahaya (*Hylocereus undatus*) genotypes. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9, 99-117.
- Gudiño, W. & De la Barrera, E. (2014). Fenología reproductiva y tolerancia a temperaturas altas en *Stenocereus queretaroensis*. *Polibotánica*, 37, 63-78.
- Guzmán-Maldonado, S. H., Morales-Montelongo, A. L., Mondragón-Jacobo, C., Herrera-Hernández, G., Guevara-Lara, F. & Reynoso-Camacho, R. (2010). Physicochemical, nutritional, and functional characterization of fruits xoconostle (*Opuntia matudae*) pears from Central-México Region. *Journal of Food Science*, 75, 485-492, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01679.x>.
- Hernández, H.M. & Godínez, H. (1994). Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas. *Acta Botánica Mexicana*, 26, 33-52, <https://doi.org/10.21829/abm26.1994.690>.
- Hernández, T., Canales, M., Ávila, J. G., Duran, A., Caballero, J., De Vivar, A. R. & Lira R. (2003). Ethnobotany and antibacterial activity of some plants used in traditional medicine of Zapotitlán de las Salinas, Puebla (Mexico). *Journal of Ethnopharmacology*, 88, 181-188, [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00213-7](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00213-7).
- Hernández, T., Canales, M., Caballero, J., Durán, A. & Lira, R. (2005). Análisis cuantitativo del conocimiento tradicional sobre plantas utilizadas para el tratamiento de enfermedades gastrointestinales en Zapotitlán de las Salinas, Puebla, México. *Interciencia* 30, 529-535.
- Hernández-Fuentes, A. D., Trapala-Islas, A., Gallegos-Vásquez, C., Campos-Montiel, R. G., Pinedo-Espinoza, J. M. & Guzmán-Maldonado, S. H. (2015). Physicochemical variability and nutritional and functional characteristics of xoconostles (*Opuntia* spp.) accessions from Mexico. *Fruits*, 70, 109-116, <https://doi.org/10.1051/fruits/2015002>.
- Hernández-López, D., Vaillant, F., Reynoso-Camacho, R. & Guzmán-Maldonado, S. H. (2008). *Myrtillocactus* (Cactaceae): botanical, agronomic, physicochemical and chemical characteristics of fruits. *Fruits*, 63, 269-276, <https://doi.org/10.1051/fruits:2008042>.

- Hunt, D., Taylor, N. & Charles, G. (2006). *The new cactus lexicon: descriptions and illustrations of the cactus family* (1 vol.). England: David Hunt Books.
- Jaafar, R. A., Ridhwan, A. A. R., Zaini, N. C. M., & Vasudevan, R. (2009). Proximate analysis of dragon fruit (*Hylecereus polyhizus*). *American Journal of Applied Sciences*, 6, 1341-1346.
- Kähkönen, M., Hopia, A. I. & Heinonen, M. (2001). Berry phenolics and their antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49, 4076-4082, 10.1021/jf010152t.
- Kanellis, A. K., Manganaris, G. A., Nath, P., Bouzayen, M., Mattoo, A. K. & Pech, J. C. (2014). 7 Antioxidants and bioactive compounds in fruits. In Nath P., Bouzayen M., Mattoo A. K., & Peach, J. C. (Eds.), *Fruit Ripening: Physiology, Signalling and Genomics*. UK: CAB International.
- Kays, S. J. (1991). *Postharvest physiology of perishable plant products*. U.S.: AVI.
- Khan, M. I. & Giridhar, P. (2015). Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*, 117, 267-295, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.06.008>.
- Kuti, J. O. (2004). Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear fruit varieties. *Food Chemistry*, 85, 527-533, [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00184-5).
- Le Bellec, F., Vaillant, F. & Imbert, E. (2006). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a new fruit crop, a market with a future. *Fruits*, 61, 237-250, <https://doi.org/10.1051/fruits:2006021>.
- Liaotrakoon, W., De Clercq, N., Van Hoed, V., Van de Walle, D., Lewille, B. & Dewettinck, K. (2013). Impact of thermal treatment on physicochemical, antioxidative and rheological properties of white-flesh and red-flesh dragon fruit (*Hylocereus* spp.) purees. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 416-430, <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0722-4>.
- Livrea, M. A. & Tesoriere, L. (2006). Health benefits and bioactive components of the fruits from *Opuntia ficus-indica* [L.] Mill. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 8, 73-90.
- López, G. R., Díaz, P. J. C. & Flores, M. G. (2000). Vegetative propagation of three species of cacti: Pitaya (*Stenocereus griseus*), Tunillo (*Stenocereus stellatus*) and Jiotilla (*Escontria chiotilla*). *Agrociencia*, 34, 363-367.
- López, M. C. R., García, M. R., Gallegos, V. C. & Sahagún, C. J. (2015). Antioxidant components and nutritional quality of 15 genotypes of xoconostle (*Opuntia* spp.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 17, 33-46.
- Luna-Morales, C. (2004). Recolección, cultivo y domesticación de Cactáceas columnares en la Mixteca Baja, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 10, 95-102.

- Luna-Morales, C. D. C. (2006). Clasificación y ordenación morfológica del fruto de variantes cultivadas de pitaya [*Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxb.] en la Mixteca Baja, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12, 245-250.
- Luna-Morales, C. & Aguirre, J. R. (2001). Clasificación tradicional, aprovechamiento y distribución ecológica de la pitaya mixteca en México. *Interciencia*, 26, 18-24.
- Lüttge, U. (2004). Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). *Annals of Botany*, 93, 629-652, <https://doi.org/10.1093/aob/mch087>.
- Martínez, V. Y. M., Andrade, R. M., Villegas, M. Á., Alia, T. I., Villegas, T. O. G. & López, M. V. (2011). Cultivo in vitro de pitayo (*Stenocereus stellatus* [Pfeiffer] Riccobono). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17, 95-105.
- Martínez-Falcón, A. P., Durbán, A., Latorre, A., Antón, J. & Marcos-García, M. A. (2012). Bacteria associated with *Copestylum* (Diptera, Syrphidae) larvae and their cactus host *Isolatocerus dumortieri*. *Plos One*, 6:e27443, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027443>.
- Martínez-González, J. C. & Cruz-Hernández, J. P. (1995). Caracterización de frutos de pitaya *S. griceus* H., en la Mixteca. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 1, 77-81.
- Mercado, J. & Granados, D. (2002). *La pitaya. Biología, Ecología, Fisiología Sistemática, Etnobotánica*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Morales, P., Barros, L., Ramírez-Moreno, E., Santos-Buelga, C. & Ferreira, I. C. (2015). Xoconostle fruit (*Opuntia matudae* Scheinvar cv. Rosa) by-products as potential functional ingredients. *Food Chemistry*, 185, 289-297, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.012>.
- Morales, P., Ramírez-Moreno, E., Sánchez-Mata, M. de C., Carvalho, A.M. & Ferreira, I.C. (2012). Nutritional and antioxidant properties of pulp and seeds of two xoconostle cultivars (*Opuntia joconostle* FAC Weber ex Diguet and *Opuntia matudae* Scheinvar) of high consumption in Mexico. *Food Research International*, 46, 279-285, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.031>.
- Moreno, Á. M. J., García, P. D., Belén, C. D., Medina, M. C. & Muñoz, O. N. (2008). Análisis bromatológico de la tuna *Opuntia elatior* Miller (Cactaceae). *Revista de la Facultad de Agronomía*, 25, 68-80.
- Moreno, L. S., Barrón, G. M. P., Martínez, H. I., Quiñones, G. Y., Menchaca, A. J. L. & Rodríguez, G. R. G. (2015). In vitro inhibition of *Helicobacter pylori* by methanolic extract of *Stenocereus marginatus* and *Castela texana*. *International Journal of Medicinal Plants and Alternative Medicine*, 3, 010-017.
- Nerd, A. F. & Mizrahi, G. (1999). Ripening and postharvest behavior of fruits of two *Hylocereus* species (Cactaceae). *Postharvest Biology and Technology*, 17, 39-45, [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(99\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(99)00035-6).

- Novoa, A., Le Roux, J. J., Robertson, M. P., Wilson, J. R. & Richardson, D. M. (2015). Introduced and invasive cactus species: a global review. *AoB Plants*, 7, 1-14, <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu078>.
- Obenland, D., Cantwell, M., Lobo, R., Collin, S., Sievert, J. & Arpaia, M. L. (2016). Impact of storage conditions and variety on quality attributes and aroma volatiles of pitahaya (*Hylocereus* spp.). *Scientia Horticulturae*, 199, 15-22, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.021>.
- Ochoa-Velasco, C. E. & Guerrero, B. J. Á. (2013). Short-wave ultraviolet-C light effect on pitaya (*Stenocereus griseus*) juice inoculated with *Zygosaccharomyces bailii*. *Journal of Food Engineering*, 117, 34-41, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.020>.
- Ochoa-Velasco, C. E. & Guerrero-Beltrán, J. Á. (2012). Ultraviolet-C light effect on pitaya (*Stenocereus griseus*) juice. *Journal of Food Research*, 1, 60-70.
- Orozco, A., Gardea, A. A., Rascón-Chu, A. & Sánchez, A. (2017). Effect of salinity on seed germination, growth and metabolic activity of pitaya seedlings [*Stenocereus thurberi* (Engelm.) Buxb.]. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 19, 67-78.
- Ortiz, H. Y. (1999). *Colección de Textos Politécnicos: Pitahaya un Nuevo Cultivo para México*. México: IPN-Editorial Limusa.
- Padrón, P. C. A. (2012). Innovaciones en el agrodesarrollo de las cactáceas. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3, 038-079.
- Palma, A., Schirra, M., D'Aquino, S., La Malfa, S. & Continellam, A. (2015). Effect of edible coating on ascorbic acid, betalains, organic acids, sugar, polyphenol content and antioxidant activity in minimally processed cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Acta Horticulturae*, 1067, 127-134, [10.17660/ActaHortic.2015.1067.17](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.17).
- Parker, K. C. (1989). Nurse plant relationships of columnar cacti in Arizona. *Physical Geography*, 10, 322-335.
- Pérez-Loredo, M. G., García-Ochoa, F. & Barragán-Huerta, B. E. (2016). Comparative analysis of betalain content in *Stenocereus stellatus* fruits and other cactus fruits using principal component analysis. *International Journal of Food Properties*, 19, 326-338, <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1022259>.
- Pimienta-Barrios, E. & Nobel, P. S. (1994). Pitaya (*Stenocereus* spp., Cactaceae): an ancient and modern fruit crop of Mexico. *Economic Botany*, 48, 76-83, <https://doi.org/10.1007/BF02901385>.
- Pimienta-Barrios, E. & Nobel, P. S. (1995). Reproductive characteristics of pitaya (*Stenocereus queretaroensis*) and their relationship with soluble sugars and irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120, 1082-1086, <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.6.1082>.

- Pimienta-Barrios, E. & Nobel, P. S. (1998). Vegetative, reproductive, and physiological adaptations to aridity of pitayo (*Stenocereus queretaroensis*, Cactaceae). *Economic Botany*, 52, 401-411, <https://doi.org/10.1007/BF02862071>.
- Pimienta-Barrios, E., Nobel, P. S., Robles-Murguía, C., Mendez-Moran, L., Pimienta-Barrios, E. & Yépez-González, E. (1997). Ethnobotany, productivity, and ecophysiology of pitaya (*Stenocereus queretaroensis*). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2, 29-47.
- Ramírez-Ramos, M., García-Mateos, M., Corrales-García, J., Ybarra-Moncada, C. & Castillo-González, A. M. (2015). Compuestos antioxidantes en variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38, 349-357.
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre, J. R. & Valiente-Banuet, A. (2006). Reproductive biology of *Opuntia*: A review. *Journal of Arid Environments*, 64, 549-585, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.06.018>.
- Rivera, G., Bocanegra-García, V. & Monge, A. (2010). Traditional plants as source of functional foods: a review. *CyTA—Journal of Food*, 8, 159-167.
- Rodríguez-Irepan, Y., Suárez-García, F. J., Mercado-Silva, E., Suarez-Rodríguez, L. M., Martínez-Pacheco, M. M., Salgado-Garciglia, R. & López-Gómez, R. (2011). Expresión del gen de la ACC oxidasa en la maduración del fruto de Pitaya (*Stenocereus stellatus* (Pfeiff.) Riccob.) Cactaceae. *Biológicas*, 13, 54-58.
- Rodríguez-Morales, J., Guillén, S. & Casas, A. (2013). Consecuencias de la domesticación de *Stenocereus stellatus* en el tamaño de las semillas y en la germinación en un gradiente de estrés hídrico. *Botanical Sciences*, 91, 485-492.
- Romero-Cerecero, O., Reyes-Morales, H., Aguilar-Santamaría, L., Huerta-Reyes, M. & Tortoriello-García, J. (2009). Use of medicinal plants among patients with diabetes Mellitus type 2 in Morelos, Mexico. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 8, 380-388.
- Rosales-Bustamante, E. P., Luna-Morales, C. D. C. & Cruz-León, A. (2009). Clasificación y selección tradicional de pitaya (*Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxb.) en Tianguistengo, Oaxaca y variación morfológica de cultivares. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15, 75-82.
- Sandate-Flores, L., Rostro-Alanis, M. de J., Mancera-Andrade, E. I., Esquivel-Hernandez, D. A., Brambila-Paz, C., Parra-Saldívar, R., ... & Escobedo-Avellaneda, Z. (2017). Using high hydrostatic pressures to retain the antioxidant compounds and to reduce the enzymatic activity of a pitaya–pineapple (*Stenocereus* sp.–*Fragaria ananassa*) beverage. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 611-619, <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2482-7>.

- Segura, L. S., Zavala, R. D., Equihua, C. C., Andrés, A. J. & Yépez, T. E. (2009). Los recursos genéticos de frutales en Michoacán. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15, 297-305.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2017). *Cierre de la Producción Agrícola 2013. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación*. Consultada en: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp.
- SIB Portal de Datos. (2015). *Especie: Stenocereus griseus*. Consultada en <http://data.sibcolombia.net/species/123867>.
- Soto-Hernández, M., Palma-Tenango, M. & García-Mateos, R. M. (2017a). *Phenolic compounds biological activity*. Croatia: Ed. INTECH.
- Soto-Hernández, M., Palma-Tenango, M. & García-Mateos, R. M. (2017b). *Phenolic compounds natural sources, importance and application*. Croatia: Ed. INTECH.
- Stintzing, F. C. & Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*, 49, 175-194, <https://doi.org/10.1002/mnfr.200400071>.
- Stintzing, F. C. & Carle, R. (2007). Betalains emerging prospects for food scientists. Review. *Trends in Food Science & Technology*, 18, 514-525, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.04.012>.
- Stintzing, F. C., Schieber, A. & Carle, R. (2003). Evaluation of colour properties and chemical quality parameters of cactus juices. *European Food Research and Technology*, 216, 303-311, <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0657-0>.
- Sumaya-Martínez, M. T., Suárez-Diéguez, T., Cruz-Cansino, N. D. S., Alanís-García, E. & Sampedro, J. G. (2010). Innovación de productos de alto valor agregado a partir de la tuna mexicana. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 27, 435-441.
- Terrazas, T., Loza-Cornejo, S. & Arreola-Nava, H. J. (2005). Anatomía caulinar de las especies del género *Stenocereus* (cactaceae). *Acta Botanica Venezuelica*, 28, 321-336.
- Treviño, N. F. J., Rodríguez, G. G. R., Verde, S. J. M., Morales, R. M. E., Garza, P. R. A., Rivas, M. C. & Oranday, C. (2012). Actividad antifúngica de *Stenocereus pruinosus* y *Echinocereus stramineus*. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 43, 42-48.
- Vázquez, C. S., Vázquez, V. S. & Espinosa, V. M. H. (2009). *Agroindustrialización de pitaya*. Cuba: Editorial Universitaria.
- Vega-Aviña, R., Aguiar-Hernández, H., Gutiérrez-García, J. A., Hernández-Vizcarra, J. A., Vega-López, I. F. & Villaseñor, J. L. (2000). Endemismo regional presente en la flora del municipio de Culiacán, Sinaloa, México. *Acta Botanica Mexicana*, 53, 1-15.

- Wildman, R. E. C. & Kelley, M. (2007). Nutraceuticals and functionals foods: In Wildman R. E. C. (Ed.), *Handbook of Nutraceuticals and Functional Foods*. U.S.: CRC Press.
- Yahia, E. M. & Mondragon-Jacobo, C. (2011). Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Food Research International*, 44, 2311-2318, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.042>.
- Yangilar, F. (2013). The application of dietary fibre in food industry: structural features, effects on health and definition, obtaining and analysis of dietary fibre: a review. *Food & Nutrition Research*, 1, 13-23, 10.12691/jfnr-1-3-1.
- Yáñez-López, L., Domínguez, J., Fajardo, M. C., Malpica, F., Soriano, J., Pelayo, C., ... & Diaz-de-León, F. (2005). Quality attributes of different types of cactus pitaya fruits (*Stenocereus griseus*). *Acta Horticulturae* 682, 645-650, 10.17660/ActaHortic.2005.682.83.
- Yetman, D. (2007). *The great cacti: ethnobotany & biogeography*. U.S.: University of Arizona Press.
- Zrýd, J. P. and Christinet, L. 2004. Betalains. In Davies K. (Ed.), *Plant Pigment and Their Manipulation*. U.S.: CRC-Press.

4. INACTIVACIÓN Y RECUPERACIÓN DE *Listeria innocua* Y *Saccharomyces cerevisiae* EN JUGO DE PITAYA (*Stenocereus pruinosus*) TRATADO CON ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA

4.1. Resumen

Se investigó la inactivación de *Listeria innocua* y *Saccharomyces cerevisiae* por efecto de la alta presión hidrostática (APH) en jugo de pitaya con un subsecuente almacenamiento (15 d) refrigerado ($4 \pm 1^\circ\text{C}$), evaluando la potencial recuperación de estos microorganismos. El jugo inoculado con 7.6 ± 0.4 o $7.3 \pm 0.3 \log_{10}$ (UFC mL^{-1}) de *L. innocua* o *S. cerevisiae*, respectivamente fue tratado con 400 a 600 MPa por 7.6 a 15 min ($T_{\text{inicial}} = 19.5 \pm 2.8^\circ\text{C}$ y $T_{\text{máx}} = 34.6 \pm 2.0^\circ\text{C}$) de acuerdo con un diseño de superficie de respuesta. También se evaluó el tiempo de elevación de la presión (CUT, Come-Up Time). Con la aplicación del tratamiento con 400 MPa no se observaron células viables de *S. cerevisiae*. Los tratamientos con 550 y 600 MPa por 16 y 12 min, respectivamente lograron reducciones de *L. innocua* mayores a 5- \log_{10} . No se observaron células viables de *S. cerevisiae* cuando el jugo fue tratado y almacenado 15 d a $4 \pm 1^\circ\text{C}$; mientras que la población de *L. innocua* se redujo más de 5- \log_{10} después de la aplicación de la APH y continuó su disminución durante el almacenamiento. La APH puede ser una alternativa no térmica viable para la producción de un jugo de pitaya estable y microbiológicamente seguro.

Palabras clave: jugo de fruta; tecnología no térmica; *come-up time*; recuperación; Bacteria Gram-positiva.

Tesis de Doctorado en Ciencias, en Ciencias Agroalimentarias, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Beatriz Quiroz González

Director de Tesis: Dra. María del Rosario García Mateos

Artículo publicado en la revista Innovative Food Science and Emerging Technologies (2018), 50, 169-173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.003>.

4.2. Introducción

Pitayo, una cactácea columnar de la subfamilia *Cactoideae*, tribu *Pachycereeae* y género *Stenocereus*, crece en zonas áridas y semiáridas de América (Terrazas, Loza-Cornejo, & Arreola-Nava, 2005). Existen alrededor de 22 a 24 especies de pitayos comestibles, de los cuales 20 son endémicos de México (Rosales-Bustamente, Luna-Morales, & Cruz-León, 2009; Bárcenas-Abogado & Jiménez-Castañeda, 2010). Sus frutas, pitayas, son bayas poliespermáticas uniloculares con formas esféricas u ovoides (García-Cruz, Salinas-Moreno, & Valle-Guadarrama, 2012). La pulpa de la pitaya es jugosa, tiene un sabor dulce agradable y un aroma fresco herbáceo. Las variedades de pitaya con coloraciones rojas y moradas reflejan su elevado contenido de betalaínas (García-Cruz, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & Luna-Morales, 2016), un pigmento soluble en agua con propiedades antioxidantes, anti-inflamatorias, anticancerígenas, antilipidémicas y antimicrobianas (Gengatharan, Dykes, & Choo, 2015). Aunque se dispone de variedades de pitayos que difieren en la estacionalidad, la comercialización es difícil debido a su corta temporada de cosecha (Armella, Yáñez-López, Soriano, & Ramírez, 2003), susceptibilidad al daño mecánico y vida de anaquel de aproximadamente seis días a 24 °C (García-Cruz *et al.*, 2016) and 12 - 14 d at 12 °C (Rosas-Benítez, Trujillo-Cárdenas, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & García-Cruz, 2016). Las investigaciones relacionadas con el valor agregado de las pitayas se han enfocado en la extensión de su vida de anaquel mientras que sus propiedades funcionales son preservadas. El jugo de pitaya pasteurizado sería una opción comercialmente viable para agregar valor al fruto, pero el tratamiento térmico provoca cambios indeseables en sus propiedades sensoriales y funcionales. A elevadas temperaturas, se provoca una escisión hidrolítica, desglicosilación (a bajo pH), descarboxilación y deshidrogenación de betalaínas, lo cual genera compuestos propensos a la oxidación y consecuentemente ocurren cambios de color en el jugo (Herbach, Stintzing, & Carle, 2006). Además, los aromas herbáceos característicos de las frutas frescas de pitaya, atribuidos a ésteres, aldehídos y alcoholes, también se ven afectados negativamente por la pasteurización térmica

(McDonald, McCollum, & Baldwin, 1996; Servili, Selvaggini, Taticchi, Begliomini, & Montedoro, 2000; Yanez-Lopez *et al.*, 2005). Las alternativas para el desarrollo de productos de valor agregado a partir del jugo de pitaya incluyen el secado por aspersion, los tratamientos con luz UV-C y el procesamiento con alta presión hidrostática (APH). El secado por aspersion permitió la obtención de un polvo encapsulado de maltodextrina a partir de jugo de pitaya para ser usado como colorante o ingrediente alimenticio funcional (García-Lucas, Méndez-Lagunas, Rodríguez-Ramírez, Campanella, Patel, & Barriada-Bernal, 2016). Se ha demostrado que el tratamiento UV-C inactiva *Zygosaccharomyces bailii* y la microbiota nativa (mesófilos aeróbios, levaduras y hongos) en jugo de pitaya (Ochoa-Velasco & Guerrero Beltrán, 2012; 2013). Una bebida de pitaya-piña tratada con APH ha demostrado que retiene la mayoría de sus compuestos antioxidantes (Sandate-Flores *et al.*, 2017), pero la inocuidad microbiológica del jugo de pitaya no ha sido demostrado. Regulaciones actuales (e.g. US Food and Drug Administration, 2001) requiere que los tratamientos de pasteurización reduzcan al menos 5-log la carga de patógenos tales como *Listeria monocytogenes*. Debido al elevado riesgo de mortalidad a causa de *L. monocytogenes*, *Listeria innocua* una cepa no patógena es usada con frecuencia en sustitución por sus similitudes fisiológicas, bioquímicas y metabólicas (Sokołowska, Skapska, Niezgoda, Rutkowska, Dekowska, & Rzoska, 2014).

Una comparación entre *L. monocytogenes* Scott A y *L. innocua* mostró que la primera es menos barotolerante cuando se somete a una presión de 400 MPa durante 1 min. Ambos microorganismos tienen barotolerancia similar cuando son sometidos a 500 MPa por 1 min (Tay, Shellhammer, Yousef, & Chism, 2003). Además, Wuytack, Diels, and Michiels (2002) clasificaron a *L. innocua* como una bacteria con resistencia intermedia cuando es comparada con bacterias Gram-positivas (*Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Lactobacillus plantarum* y *Leuconostoc dextranicum*). Estos autores atribuyeron la barorresistencia de las bacterias Gram-positivas a las diferencias observadas en la pared celular, donde la mayor concentración de peptidoglucanos está presente en bacterias con elevada resistencia.

Saccharomyces spp. y otras levaduras presentes en frutos, con conteos que alcanzan $10^3 - 10^5$ UFC g^{-1} son típicamente responsables del deterioro de jugos de frutas. Los jugos son ricos en azúcares y contienen aminoácidos, minerales y vitaminas. El deterioro de jugos ocurre cuando las levaduras metabolizan los azúcares en alcohol etílico y dióxido de carbono. Entre las especies de levaduras, *Saccharomyces cerevisiae* es responsable de los procesos de fermentación alcohólica (Walker & Stewart, 2016; Martins Salomão, 2017) y, por lo tanto, deben controlarse para prolongar la vida útil del jugo de pitaya. También se debe considerar la recuperación de estos microorganismos después de una lesión subletal causada por las condiciones de procesamiento con APH y, por lo tanto, es altamente recomendable un análisis microbiológico de los productos tratados con APH después de varios días de almacenamiento (Bozoglu, Alpas, & Kaletunç, 2004). La probabilidad de recuperación del daño depende de las especies/cepas microbianas y de las condiciones de procesamiento. Finalmente, la inactivación microbiana después del *come-up time* (CUT, i.e., tiempo requerido para llegar a la presión objetivo) también podría ser evaluada para la descripción completa de los efectos de la APH (Palou, Lopez-Malo, Barbosa-Cánovas, Welti-Chanes, Davidson, & Swanson, 1998; Guerrero-Beltrán, Barbosa-Cánovas, & Welti-Chanes, 2011; Serment-Moreno, Fuentes, Guerrero-Beltrán, Torres, & Welti-Chanes, 2017). Por lo tanto, los objetivos de esta investigación fueron evaluar el efecto de los parámetros de APH, el nivel de presión y el tiempo de procesamiento (incluidos los efectos CUT) sobre la inactivación de *L. innocua* y *S. cerevisiae* en jugo de pitaya y su potencial de recuperación bajo temperatura de refrigeración.

4.3. Materiales y métodos

4.3.1. Material vegetal

Las pitayas (*Stenocereus pruinosus*, también conocida como “Pitaya de Mayo”) se cosecharon en madurez fisiológica en una plantación comercial de Santa Clara Huitziltepec, Puebla, México (Latitud: 18° 46 'N, Longitud: 97° 53' O). Después de la cosecha, las pitayas fueron almacenadas durante la noche a 12 ± 2 °C, con la finalidad de eliminar el calor de campo. Posteriormente las pitayas

se transportaron al laboratorio vía transporte terrestre (approx. 12 h), adicionalmente se almacenaron a 16 ± 2 °C. Para la extracción del jugo, se removieron manualmente las espinas de las frutas, se desinfectaron con hipoclorito de sodio (0.05 % v/v) y finalmente, se removió la cáscara. El jugo de pitaya se extrajo con una despulpadora (MAPISA Polinox™, Ciudad de México, México) equipada con un tamiz de 0.3 mm de diámetro de poro. Finalmente, el jugo de pitaya (pH 5.2 y 10 °Bx) se envasó en bolsas para congelación (aprox. 1.5 L), se congeló (-20 °C) y se usó dentro de 9 meses.

4.3.2. Reactivos

Caldo de soya tripticaseína (CST), infusión cerebro corazón (ICC), agar dextrose y papa (ADP), y peptona fueron adquiridos de BD Bioxon (Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México). Extracto de levadura (EL), NaCl, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ fueron adquiridos de Sigma-Aldrich™ (St. Louis, MO). Caldo extracto de levadura y extracto de malta (CLM) y agar-agar fueron adquiridos de BD Difco™ (Sparks, MD), Hycel (Zapopan, Jalisco, México), y DEQ (Monterrey, NL, México), respectivamente. Se empleó agua bi-distilada para la preparación de todos los medios de cultivo, agua peptonada y solución *buffer*.

4.3.3. Material biológico

Las cepas de *L. innocua* (ATCC® 33090™) y *S. cerevisiae* (ATCC® 20252™) fueron obtenidas de la colección de cultivos del Centro de Biotecnología FEMSA en el Tecnológico de Monterrey (Monterrey, NL, México), las cuales se usaron por separado para la inoculación del jugo de pitaya.

Curva de crecimiento

Una muestra del inóculo de *L. innocua* se transfirió en caldo de soya tripticaseína con 0.6 % (p/p) de extracto de levadura (CST-EL) e incubada a 37 °C con agitación constante (150 rpm) por 16 h (Incubating Orbital Shaker Model 3500I, VWR, Radnor, PA). Posteriormente, se tomó una alícuota (1 mL) del inóculo incubado y se inoculó en CST-EL fresco e incubado bajo las mismas condiciones, se realizaron muestreos cada 6 h por 30 h (Apéndice 6.2, Figura 13). Para el caso de *S. cerevisiae* se usó un CLM como medio de crecimiento, la

temperatura de incubación fue de 27 °C, y el muestreo se realizó cada 12 h durante 48 h (Apéndice 6.2, Figura 13). El tiempo para alcanzar la fase exponencial fueron 17 y 19 h para *L. innocua* y *S. cerevisiae*, respectivamente, mientras la fase estacionaria temprana se alcanzó a las 19 y 25 h, respectivamente.

Cultivo stock

Un alícuota (1 mL) de *L. innocua* se inoculó en CST-EL (100 mL) e incubó bajo las condiciones descritas previamente hasta alcanzar la fase exponencial (Bruschi, Komora, Castro, Saraiva, Ferreira, & Teixeira, 2017). Para la obtención de un *pellet* de células, 50 mL del inóculo se centrifugaron a 10 062 g por 5 min. Después, el *pellet* fue lavado dos veces con *buffer* fosfato salino (PBS, pH 6.2) y resuspendido en una solución de PBS-glicerol (relación 4:1) para obtener el cultivo *stock*. El cultivo *stock* se colocó en tubos de centrífuga (1 mL) de polipropileno y se almacenó a -80 °C y usados durante 30 d. El cultivo *stock* de *S. cerevisiae* se preparó de manera similar, con el uso de su medio de cultivo correspondiente e incubación a 27 °C.

Inóculo microbiano

1 mL del cultivo *stock* de *L. innocua* previamente descongelado se agregó a 100 mL de un medio CST-EL e incubó a 37 °C hasta alcanzar la fase estacionaria temprana. Siguiendo la metodología previamente descrita, se recuperaron las células mediante centrifugación, lavadas dos veces con PBS, y resuspendidas en PBS (3 mL), logrando una concentración final de 8 – 10 log₁₀ (UFC mL⁻¹). De manera similar, 1 mL del cultivo *stock* de *S. cerevisiae* (descongelado) se agregó a 100 mL de un medio CLM e incubó a 27 °C. Después de la recuperación y el lavado por centrifugación, y resuspensión en 3 mL de PBS, el procedimiento logró alrededor de 8.5 log₁₀ (UFC mL⁻¹).

Inoculación del jugo

150 mL de jugo de pitaya previamente esterilizado a 121 °C por 15 min (Autoclave SM-510, Yamato Scientific America Inc., Santa Clara, CA), se inoculó (1 mL) para la obtención de una concentración inicial de 7.4 ± 0.3 y 7.6 ± 0.4 log₁₀ (UFC mL⁻¹).

¹⁾ de *S. cerevisiae* y *L. innocua*, respectivamente. El jugo inoculado se almacenó por 2 h a 21 ± 1 °C antes de la aplicación de los tratamientos.

Conteo microbiano

Alicuotas de jugo inoculado tratado y sin tratar se diluyeron decimalmente usando agua peptonada al 0.1 % (p/v) (las primeras diluciones consistieron en diluir 5 mL de jugo en 45 mL de agua peptonada, y en las siguientes se diluyó 1 mL de la primera dilución en 9 mL de agua peptonada). Las diluciones de *L. innocua* se inocularon en placas con 1.5 % (p/v) de agar cerebro corazón e incubadas a 37 °C por 48 h. el contenido de *S. cerevisiae* se obtuvo en placas con PDA incubadas a 27 °C por 5 d. Los valores se expresaron como $\log_{10}(N/N_0)$ (N : UFC mL⁻¹ al tiempo t , N_0 : UFC mL⁻¹ iniciales) y se reportaron como valores promedio.

4.3.4. Procesamiento del jugo con altas presiones hidrostáticas (APH)

15 mL de jugo inoculado fueron envasados al vacío (EVD-4, Comercializadora Internacional Torrey S.A. de C.V., Guadalupe, NL, México) en bolsas de polietileno (Filmpack S.A. de C.V., Guadalupe, NL, México). Las muestras se presurizaron como se resume en el Cuadro 6 (Model 2L, Avure Technologies, Inc., Columbus, OH), usando agua como medio de presurización. También se evaluó el efecto del CUT en cada nivel de presión. Se usó un mínimo tiempo de procesamiento (1 s) después del CUT para asegurar que se alcanzó el nivel de presión deseado (CUT de 35 y 116 s para 400 y 600 MPa, respectivamente). Los jugos tratados se almacenaron a 4 ± 1 °C hasta la evaluación microbiológica (aprox. 2 h después del tratamiento).

Cuadro 6. Diseño compuesto central (superficie de respuesta), con las condiciones de procesamiento del jugo de pitaya y los datos codificados.

Condiciones de procesamiento		Datos codificados	
Presión (MPa)	Tiempo (min)	Presión	Tiempo
400	11.3	0	-1.414
430	8.7	-1	-1
430	13.8	1	-1
500	11.3	0 ^z	0 ^z
500	15.0	1.414	0
500	7.6	-1.414	0
570	8.7	-1	1
570	13.8	1	1
600	11.3	0	1.414

^zEn el punto central (0) del diseño se realizaron 5 repeticiones.

Posteriormente, se obtuvieron 4 tratamientos, los cuales lograron la reducción de 5 log UFC mL⁻¹ la población de *L. innocua*. Muestras de jugo inoculado fueron separadas en tres lotes, uno se mantuvo sin tratamiento, mientras que los dos restantes se procesaron bajo dos condiciones de APH (550 MPa por 12 y 16 min, y 600 MPa por 8 y 12 min); las muestras de jugos tratados y sin tratar se almacenaron por 15 d a 4 ± 1 °C y se muestrearon al tiempo 0 (2 h después de la aplicación del tratamiento) y cada 5 d.

4.3.5. Análisis estadístico

Se generó un diseño experimental compuesto central con dos factores (presión: 400 – 600 MPa; tiempo: 7.3 – 15 min), 5 niveles y 5 puntos centrales (Cuadro 6) usando Minitab® 17.1.0 (Minitab Inc., State College, PA) y los resultados se analizaron mediante la metodología de superficie de respuesta para la obtención de la siguiente ecuación polinomial de segundo grado (Ec. 1):

$$Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_1x_2 + B_4x_1^2 + B_5x_2^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde: B_0 = constante, B_1 y B_2 = coeficientes lineales, B_3 = coeficiente de product cruzado, B_4 y B_5 = coeficientes cuadráticos, x_1 y x_2 = variables independientes (presión y tiempo de procesamiento), y $Y = \log_{10}(N/N_0)$. Se obtuvo un modelo simplificado usando $p = 0.05$ para discriminar los términos no significativos. Para

validar la fiabilidad del modelo simplificado obtenido, con base en los datos experimentales, se seleccionaron 4 tratamientos que probablemente lograrían una reducción de cinco ciclos logarítmicos de *L. innocua*. El porcentaje de error (*E* %) fue calculado con la siguiente ecuación (Ec. 2):

$$E \% = \left| \frac{\log_{10}(N/N_0)_{experimental} - \log_{10}(N/N_0)_{predicted}}{\log_{10}(N/N_0)_{experimental}} \right| \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

El análisis estadístico se realizó con el programa estadístico Minitab® 17.1.0 (Minitab Inc., State College PA). Los valores del CUT y los experimentos de recuperación se evaluaron mediante un ANOVA y una prueba Tukey ($p = 0.05$). Los resultados se reportaron como la media \pm desviación estándar. Para el experimento de superficie de respuesta, los valores se obtuvieron de $n = 4$ repeticiones, mientras que la validación del modelo se realizó con $n = 12$ repeticiones.

4.4. Resultados y discusión

4.4.1. Efecto del *Come-Up Time* sobre la población de *S. cerevisiae*

S. cerevisiae fue susceptible al efecto del CUT independientemente de la presión (400 - 600 MPa) aplicada, dado que después de la aplicación del CUT (CUT de 35 y 116 s para 400 y 600 MPa respectivamente) no se observó sobrevivencia de la población de *S. cerevisiae*, lo que representa la reducción de al menos 7- \log UFC mL⁻¹ (Apéndice 6.1, Cuadro 26). Palou *et al.* (1998) reportaron que el CUT de presiones que exceden 200 MPa ha logrado reducciones significativas de las cuentas de *S. cerevisiae* y *Z. bailii*, cuando estos microorganismos son tratados durante su fase de crecimiento exponencial y estacionaria en medios con diferente actividad de agua, sin mostrar sobrevivencia a presiones mayores que 517 MPa. Guerrero-Beltrán *et al.* (2011) observaron reducciones mayores de 5 \log de *S. cerevisiae* en jugo de naranja tratado durante el CUT (>144s) de presiones superiores a 276 MPa. La susceptibilidad de *S. cerevisiae* a la alta presión esta relacionada con el daño a la estructura intracelular y membranas (Shimada, Andou, Naito, Yamada, Osumi, & Hayashi, 1993; Brul, Rommens, & Verrips, 2000). Es importante tener en cuenta que las células vegetativas de *S.*

cerevisiae son menos baroresistentes que sus ascosporas (Parish, 1998), debido a que las ascosporas, a diferencia de la células vegetativas, están compuestas por cuatro capas multilaminares, la primera de manano, la segunda de beta-glucano, la tercera de quitosano y la capa más externa de dityrosina; estas capas proporcionan a la espora la protección contra el estrés ambiental. De manera particular, la dityrosina es un componente principal de la espora que es responsable del incremento de la resistencia a ciertos tipos de estrés (Rozali, Milani, Elham Deed, & Silva, 2017).

Debido al efecto significativo del CUT sobre la inactivación de *S. cerevisiae*, este microorganismo no fue empleado en el análisis de superficie de respuesta.

4.4.2. Efecto del *Come-Up Time* sobre la población de *L. innocua*

Para el caso de *L. innocua*, se observaron reducciones menores a 0.2 log sin mostrar diferencias significativas en todas las presiones probadas para evaluar el efecto del CUT (Cuadro 7). Estos resultados son similares a los obtenidos por Guerrero-Beltrán *et al.* (2011) en jugo de naranja Navel (pH = 3.4) inoculado con *L. innocua*, y tratado con CUT (132 s) por debajo de 241 MPa. Sin embargo, estos autores reportaron mayor inactivación de este microorganismo con la aplicación de presión ≥ 276 MPa (CUT ≥ 144 s).

Cuadro 7. Efecto del *Come-Up Time* (CUT) sobre la inactivación de *Listeria innocua* en jugo de pitaya.

CUT (s) ^z	Presión (MPa) ^y	\log_{10} UFC mL ⁻¹ (media \pm desviación estándar)
35	400	-0.06 \pm 0.07 a ^x
85	430	-0.10 \pm 0.05 a
96	500	-0.13 \pm 0.10 a
108	570	-0.01 \pm 0.04 a
116	600	-0.02 \pm 0.01 a

^zCUT= tiempo requerido para alcanzar la presión de procesamiento.

^yEl tiempo de procesamiento para cada nivel de presión fue de 1 s.

^xMedias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (prueba Tukey, $p > 0.05$).

La resistencia de *L. innocua* a la APH ha sido atribuida a su naturaleza Gram-positiva, debido a que este tipo de bacterias tiene alrededor de 40 capas de

peptidoglucano, las cuales brindan mayor protección a la célula (Wuytack *et al.*, 2002) durante la presurización.

4.4.3. Efecto de la alta presión hidrostática sobre la población de *L. innocua*

De acuerdo con los valores reportados en otros jugos de frutas tratados con APH, el elevado pH (5.3 ± 0.1) del jugo de pitaya redujo la letalidad de la APH sobre *L. innocua* (Cuadro 8). Por ejemplo, Guerrero-Beltrán *et al.* (2011) observaron 7.4 reducciones log de *L. innocua* en jugo de naranja (pH 3.4) cuando fue presurizado con un CUT (3.2 min) de 414 MPa. Sokołowska *et al.* (2014) reportaron 3.8 – 4.8 reducciones log en jugo de betabel acidificado (pH 4.2) cuando fue tratado a 400 MPa por 10 min. Dogan and Erkmen (2004) encontraron que la aplicación de 400 MPa durante 10 min redujo 5 y 6 log la población de *L. monocytogenes* en jugo de durazno (pH 5.2) y naranja (pH 3.55), respectivamente. Buzrul, Alpas, Largeteau, and Demazeau (2008) lograron la reducción de 4 y 1 log la población *L. innocua* en jugo de kiwi (pH 3.32) y piña (pH 3.77), respectivamente, con la aplicación de menores niveles de presión (300 MPa) y tiempo (5 min) que los evaluados en este estudio. Aunque las reducciones de la carga microbiana en los ejemplos mencionados son más altas que las observadas en este trabajo, la matriz de estos jugos tenía un pH menor, lo que implica que el medio de dispersión no contaba con un ambiente propicio para el desarrollo de los microorganismos en cuestión, por lo tanto, el pH de los jugos evaluados en los trabajos mencionados desempeñó la función de tecnología de barrera y en combinación con la aplicación de la APH, se obtuvo una mayor inactivación microbiana. Como en los tratamientos térmicos y en otras tecnologías, la inactivación bacteriana por efecto de la APH, además del pH, depende de la cepa microbiana y matriz alimenticia (Sokołowska *et al.*, 2014); por ejemplo, los elevados contenidos de sal o azúcar, y bajos contenidos de agua, ejercen un efecto baroprotector elevado (Cheftel, 1995). Para el caso del jugo de pitaya se ha reportado en su composición, carbohidratos, proteínas, lípidos y fibra; además de minerales como fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre zinc y manganeso (García-Cruz *et al.*, 2013).

El modelo predictivo (obtenido con los datos del Cuadro 8) para la inactivación de *L. innocua* en jugo de pitaya (Ec. 3, $R_{adj}^2 = 86.8 \%$) se simplificó mediante la eliminación de los factores sin efecto significativo ($p > 0.05$, Ec. 4, $R_{adj}^2 = 86.7 \%$). Con base en este modelo simplificado, se generó un gráfico de contorno para la identificación de las condiciones de presión y tiempo (Figura 5) que lograron una reducción de al menos 5-log (área más oscura).

Cuadro 8. Efecto del nivel de presión y tiempo de tratamiento con APH sobre la inactivación de *Listeria innocua* en jugo de pitaya.

Pressure (MPa)	Time (min) ^z	\log_{10} UFC mL ⁻¹ (media \pm desviación estándar)
400	11.3	-0.23 \pm 0.03
430	8.7	-0.40 \pm 0.02
430	13.8	-0.44 \pm 0.07
500	7.6	-1.53 \pm 0.16
500	11.3	-3.39 \pm 0.10
500	11.3	-3.51 \pm 0.23
500	11.3	-3.39 \pm 0.22
500	11.3	-3.32 \pm 0.08
500	11.3	-4.06 \pm 0.21
500	15.0	-4.95 \pm 0.15
570	8.7	-5.51 \pm 0.10
570	13.8	-4.96 \pm 0.41
600	11.3	-5.15 \pm 0.10

^zTiempo de procesamiento después del CUT, CUT= tiempo requerido para alcanzar la presión de procesamiento (35 - 116 s para 400 - 600 MPa, respectivamente).

$$\log_{10} \frac{N}{N_0} = 44.6 - 0.131P - 1.18t + 0.00085Pt + 0.000092P^2 + 0.0239t^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\log_{10} \frac{N}{N_0} = 35.7 - 0.1171P - 0.213t + 0.000088P^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

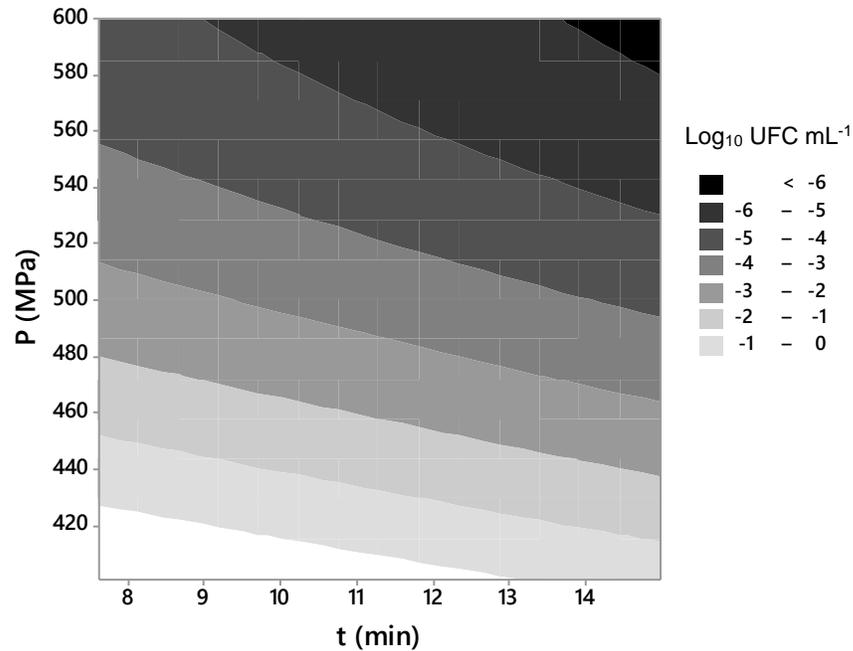


Figura 5. Gráfica de contornos de la inactivación de la población de *L. innocua* en jugo de pitaya tratado con APH.

4.4.4. Validación del modelo de superficie de respuesta

Para validar el modelo de superficie de respuesta se seleccionaron cuatro condiciones de procesamiento: 550 MPa por 12 y 16 min, y 600 MPa por 8 y 12 min (Cuadro 9). El tiempo de 16 min excedió el límite superior del diseño de superficie de respuesta, pero se consideró necesario para lograr reducciones de 5-log con base en los niveles de inactivación provocados por los tratamientos 500 MPa/15 min y 570 MPa/8.7 y 13.8 min. En general, el modelo (Ec. 4) sobreestimó ligeramente la reducción de *L. innocua*, con excepción del tratamiento 550 MPa/16 min donde ocurrió lo opuesto. El error de predicción fue menor a 10 %, excepto para el tratamiento 550 MPa/12 min, lo que indicó que el modelo puede ser empleado para la estimación de valores de inactivación de *L. innocua*.

Cuadro 9. Validación del modelo de superficie de respuesta (simplificado) para la predicción de la inactivación de *Listeria innocua* en jugo de pitaya tratado con APH^z.

Presión (MPa)	Tiempo (min) ^y	\log_{10} UFC mL ⁻¹		E % ^x
		Observada (media \pm desviación estándar)	Predicha	
550	12	-4.07 \pm 0.73 a ^w	-4.67	14.7
550	16	-6.04 \pm 0.35 c	-5.52	8.6
600	8	-4.33 \pm 0.51 ab	-4.61	6.6
600	12	-5.01 \pm 0.63 b	-5.46	9.1

^zAPH= alta presión hidrostática.

^yTiempo de procesamiento después del CUT, CUT= tiempo requerido para alcanzar la presión de procesamiento (102 y 116 s para 550 y 600 MPa, respectivamente).

^xE %= Porcentaje de error.

^wMedias con letras diferentes indican diferencias significativas (prueba Tukey, $p < 0.05$).

4.4.5. Evaluación del potencial de recuperación de *L. innocua* durante el almacenamiento refrigerado (15 d)

Wemekamp-Kamphuis, Karatzas, Wouters, & Abee (2002) mostraron que *L. monocytogenes* puede sobrevivir en condiciones de almacenamiento refrigerado mediante la producción de proteínas de choque frío después de ser expuesta a la APH. En el presente estudio, la carga inicial de *L. innocua* del jugo de pitaya sin tratar, 9.5×10^7 UFC mL⁻¹, no cambió significativamente durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C por 15 d. Los tratamientos 550 MPa por 16 min y 600 MPa por 12 min redujeron las cuentas a 9.5×10^1 y 2.3×10^2 UFC mL⁻¹, respectivamente, sin mostrar diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el efecto de estos dos tratamientos. Se observó una reducción significativa ($p > 0.05$) adicional (hasta 1.2 log) durante el almacenamiento (a 4 ± 1 °C) de los jugos tratados con 600 MPa/12 min (Cuadro 10). Estos resultados fueron inesperados, debido a la naturaleza psicrófila de *Listeria* y el pH 5.2 del jugo de pitaya. Aunque esto sugiere que las células presurizadas son más sensibles a la presencia de un compuesto bactericida presente en el jugo de pitaya, lo cual es consistente con las propiedades antibacterianas reportadas en extractos de

Stenocereus spp. (e.g., Soto-Cabrera *et al.*, 2016), las cuales podrían estar relacionadas con el contenido de betalaínas (Lila, 2004) y fenoles totales (Oluwasina, Ezenwosu, Ogidi, & Oyetayo, 2019) contenidos en el jugo de pitaya. No obstante, con respecto a lo mencionado anteriormente, se requiere información adicional para confirmar esta posibilidad.

Cuadro 10. Recuperación de *L. innocua* en jugo de pitaya después de 15 d de almacenamiento a $4 \pm 1^\circ\text{C}$.

Tiempo de almacenamiento	\log_{10} UFC mL ⁻¹ (media \pm desviación estándar)		
	Sin tratar	550 MPa-16 min ^z	600 MPa-12 min ^z
0	7.98 \pm 0.03 a ^x	1.97 \pm 0.08 b	2.36 \pm 0.05 b
5	7.75 \pm 0.04 a	1.49 \pm 0.54 c	2.17 \pm 0.37 b
10	7.70 \pm 0.10 a	1.13 \pm 0.21 cd	1.00 \pm 0.00 d
15	7.84 \pm 0.04 a	1.40 \pm 0.41 cd	1.10 \pm 0.16 cd

^zEl tiempo de procesamiento reportado fue después del CUT, CUT= tiempo requerido para alcanzar la presión de procesamiento (102 y 116 s para 550 y 600 MPa, respectivamente).

^xMedias con letras diferentes indican diferencias significativas (prueba Tukey, $p < 0.05$).

4.4.6. Evaluación del potencial de recuperación de *S. cerevisiae* durante el almacenamiento refrigerado (15 d)

No se observó sobrevivencia de *S. cerevisiae* después del tratamiento con APH ni durante el almacenamiento (15 d, $4 \pm 1^\circ\text{C}$), mientras que se observaron ligeros decrementos (8.4×10^6 a 1.5×10^6 UFC mL⁻¹) en las muestras sin tratar (Cuadro 11).

Cuadro 11. Supervivencia de *S. cerevisiae* en jugo de pitaya tratado con APH^z y almacenado a 4 ± 1°C.

Tiempo de almacenamiento (días)	\log_{10} UFC mL ⁻¹ (media ± desviación estándar)		
	Sin tratar	550 MPa-16 min ^y	600 MPa-12 min ^y
0	6.93 ± 0.03 a ^x	Nd ^w	Nd
5	6.25 ± 0.09 b	Nd	Nd
10	6.06 ± 0.15 bc	Nd	Nd
15	6.18 ± 0.10 c	Nd	Nd

^zAlta presión hidrostática.

^yEl tiempo de procesamiento reportado fue después del CUT, CUT= tiempo requerido para alcanzar la presión de procesamiento (102 y 116 s para 550 y 600 MPa, respectivamente).

^xMedias con letras diferentes indican diferencias significativas (prueba Tukey, p < 0.05).

^wNd= No detectado.

4.5. Conclusiones

La aplicación del CUT (35 s) de 400 MPa inactivó la población de *S. cerevisiae* hasta niveles no detectables. Por otro lado, no se observaron reducciones significativas de *L. innocua* por efecto del CUT (35 – 116 s) de todos los niveles de presión evaluados (400 - 600 MPa). Los tratamientos 550 MPa/16 min y 600 MPa/12 min lograron la reducción de 5 \log_{10} la población de *L. innocua* en jugo de pitaya sin acidificar. La baroresistencia de *L. innocua* puede ser atribuida a la composición de la matriz del jugo y el decremento de la población de *Listeria* durante el almacenamiento sugiere la presencia de un compuesto activo con efecto bacteriostático o bactericida sobre células presurizadas, pero es necesario realizar más investigación para confirmar estos supuestos. Se puede concluir que el jugo de pitaya tratado con APH cumple con las regulaciones actuales para jugos pasteurizados, ya que la población de *L. innocua* se mantuvo, durante 15 d (4 ± 1 °C) con reducciones mayores a 5 log UFC mL⁻¹.

4.6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Tecnológico de Monterrey (fondos de la cátedra de investigación GEE1A01001 y CDB081), Universidad Autónoma Chapingo, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la

beca (265456) para la realización de estudios de doctorado otorgada a la autora Quiroz-González.

4.7. Literatura citada

- Armella, M. A., Yáñez-López, L., Soriano, J. S., & Ramírez, G. R. (2003). Phenology, postharvest physiology and marketing of pitaya (*Stenocereus griseus*, L.) as a sustainable resource. *Acta Horticulturae*, 598, 251–254, [10.17660/ActaHortic.2003.598.37](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.598.37).
- Bárcenas-Abogado, P., & Jiménez-Castañeda, V. (2010). Pitayas y Pitahayas (*Stenocereus spp.* e *Hylocereus spp.*), recursos agrícolas en el Valle de Tehuacán Puebla. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 10, 101–119.
- Bozoglu, F., Alpas, H., & Kaletunç, G. (2004). Injury recovery of foodborne pathogens in high hydrostatic pressure treated milk during storage. *FEMS Immunology and Medical Microbiology*, 40, 243–247, [https://doi.org/10.1016/S0928-8244\(04\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0928-8244(04)00002-1).
- Brul, S., Rommens, A. J. M., & Verrips, C. T. (2000). Mechanistic studies on the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high pressure. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 1, 99–108, [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(00\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(00)00008-4).
- Bruschi, C., Komora, N., Castro, S. M., Saraiva, J., Ferreira, V. B., & Teixeira, P. (2017). High hydrostatic pressure effects on *Listeria monocytogenes* and *L. innocua*: Evidence for variability in inactivation behaviour and in resistance to pediocin bacHA-6111-2. *Food Microbiology*, 64, 226–231, <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.01.011>.
- Buzrul, S., Alpas, H., Largeteau, A., & Demazeau, G. (2008). Inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in kiwifruit and pineapple juices by high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Microbiology*, 124, 275–278, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.03.015>.
- Cheftel, J. C. (1995). Review: High-pressure, microbial inactivation and food preservation. *Food Science and Technology International*, 1, 75–90, <https://doi.org/10.1177/108201329500100203>.
- Dogan, C., & Erkmen, O. (2004). High pressure inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* inactivation in broth, milk, and peach and orange juices. *Journal of Food Engineering*, 62, 47–52, [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00170-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00170-5).
- García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., & Valle-Guadarrama, S. (2012). Betalains, phenolic compounds and antioxidant activity in pitaya de Mayo (*Stenocereus griseus* H.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35, 1–5.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y. & Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, chemical, and antioxidant activity characterization of

- Pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68, 403-410. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0391-8>.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Luna-Morales, C. d. C. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69-76, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.004>.
- García-Lucas, K. A., Méndez-Lagunas, L. L., Rodríguez-Ramírez, J., Campanella, O. H., Patel, B. K., & Barriada-Bernal, L. G. (2016). Physical properties of spray dried *Stenocereus griseus* pitaya juice powder. *Journal of Food Process Engineering*, 40, 1-9, <https://doi.org/10.1111/jfpe.12470>.
- Gengatharan, A., Dykes, G. A., & Choo, W. S. (2015). Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 645-649, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.052>.
- Guerrero-Beltrán, J. Á., Barbosa-Cánovas, G. V., & Welte-Chanes, J. (2011). High hydrostatic pressure effect on natural microflora, *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli*, and *Listeria Innocua* in Navel orange juice. *International Journal of Food Engineering*, 7, 1-16, <https://doi.org/10.2202/1556-3758.2166>.
- Herbach, K. M., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Betalain stability and degradation. Structural and chromatic aspects. *Journal of Food Science*, 71, R41-R50, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x>.
- Martins Salomão, B. d. C. (2017). Pathogens and spoilage microorganisms in fruit juice: An overview. In Rajauria G., & Tiwari B. K. (Eds.), *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis*. U.S.: Academic Press.
- McDonald, R. E., McCollum, T. G., & Baldwin, E. A. (1996). Prestorage heat treatments influence free sterols and flavor volatiles of tomatoes stored at chilling temperature. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121, 531-536, <https://doi.org/10.21273/JASHS.121.3.531>.
- Lila, D. K. (2004). Plant pigments and human health. In Davies, K. (Ed.), *Plant pigments and their manipulation* (Volume 14). U.S.: CRC Press.
- Ochoa-Velasco, C. E., & Guerrero Beltrán, J. A. (2012). Ultraviolet-C light effect on pitaya (*Stenocereus griseus*) juice. *Journal of Food Research*, 1, 60-70, 60–70. <https://doi.org/10.5539/jfr.v1n2p60>.
- Ochoa-Velasco, C. E., & Guerrero Beltrán, J. A. (2013). Short-wave ultraviolet-C light effect on pitaya (*Stenocereus griseus*) juice inoculated with *Zygosaccharomyces bailii*. *Journal of Food Engineering*, 117, 34-41, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.020>.
- Oluwasina, O. O., Ezenwosu, I. V., Ogidi, C. O., & Oyetayo, V. O. (2019). Antimicrobial potential of toothpaste formulated from extracts of *Syzygium aromaticum*, *Dennettia tripetala* and *Jatropha curcas* latex against some

oral pathogenic microorganisms. *AMB Express*, 9, 20, <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0744-2>.

- Palou, E., Lopez-Malo, A., Barbosa-Cánovas, G. V., Welti-Chanes, J., Davidson, P. M., & Swanson, B. G. (1998). High hydrostatic pressure come-up time and yeast viability. *Journal of Food Protection*, 61, 1657-1660, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-61.12.1657>.
- Parish, M. E. (1998). High pressure inactivation of *Saccharomyces cerevisiae*, endogenous microflora and pectinmethylesterase in orange juice. *Journal of Food Safety*, 18, 57-65, <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.1998.tb00202.x>.
- Rosales-Bustamente, P., Luna-Morales, C. D. C., & Cruz-León, A. (2009). Clasificación y selección tradicional de pitaya (*Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxb.) en Tlanguistengo, Oaxaca y variación morfológica de cultivares. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 15, 75-82.
- Rosas-Benítez, A., Trujillo-Cárdenas, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & García-Cruz, L. (2016). Quality attributes of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruit handled in postharvest with and without thorns under refrigerated storage. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 22, 191-207, doi: 10.5154/r.rchsh.2016.04.011.
- Rozali, S. N., Milani, E. A., Deed, R. C., & Silva, F. V. (2017). Bacteria, mould and yeast spore inactivation studies by scanning electron microscope observations. *International Journal of Food Microbiology*, 263, 17-25, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.008>.
- Sandate-Flores, L., Rostro-Alanis, M. D. J., Mancera-Andrade, E. I., Esquivel-Hernandez, D. A., Brambila-Paz, C., Parra-Saldívar, R., Welti-Chanes, J., Escobedo-Avellaneda, Z., & Rodríguez-Rodríguez, J. (2017). Using high hydrostatic pressures to retain the antioxidant compounds and to reduce the enzymatic activity of a pitaya–pineapple (*Stenocereus* sp.–*Fragaria ananassa*) beverage. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 611-619, <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2482-7>.
- Serment-Moreno, V., Fuentes, C., Guerrero-Beltrán, J. Á., Torres, J. A., & Welti-Chanes, J. (2017). A Gompertz model approach to microbial inactivation kinetics by high pressure processing (HPP): incorporating come-up time effects, initial counts and detection limit. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1495-1508, <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1916-1>.
- Servili, M., Selvaggini, R., Taticchi, A., Begliomini, A. L., & Montedoro, G. (2000). Relationships between the volatile compounds evaluated by solid phase microextraction and the thermal treatment of tomato juice: Optimization of the blanching parameters. *Food Chemical News*, 71, 407-415, [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00187-4).
- Shimada, S., Andou, M., Naito, N., Yamada, N., Osumi, M., & Hayashi, R. (1993). Effects of hydrostatic pressure on the ultrastructure and leakage of internal

- substances in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 40, 123-131, <https://doi.org/10.1007/BF00170440>.
- Sokołowska, B., Skapska, S., Niezgodna, J., Rutkowska, M., Dekowska, A., & Rzoska, S. J. (2014). Inactivation and sublethal injury of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* by high hydrostatic pressure in model suspensions and beetroot juice. *High Pressure Research*, 34, 147-155, <https://doi.org/10.1080/08957959.2013.877458>.
- Soto-Cabrera, D., Salazar, J. R., Noguera-Gutiérrez, I., Torres-Olvera, M., Cerón-Nava, A., Rosales-Guevara, J., ... & Rosas-Acevedo, H. (2016). Quantification of polyphenols and flavonoid content and evaluation of anti-inflammatory and antimicrobial activities of *Stenocereus stellatus* extracts. *Natural Product Research*, 30, 1885-1889, <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1084302>.
- Tay, A., Shellhammer, T. H., Yousef, A. E., & Chism, G. W. (2003). Pressure death and tailing behavior of *Listeria monocytogenes* strains having different barotolerances. *Journal of Food Protection*, 66, 2057-2061, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.11.2057>.
- Terrazas, T., Loza-Cornejo, S., & Arreola-Nava, H. J. (2005). Anatomía caulinar de las especies del género *Stenocereus* (Cactaceae). *Acta Botánica Venezolánica*, 28, 321-336.
- US Food and Drug Administration. (2001). Hazard analysis and critical control Point (HACCP); procedures for the safe and sanitary processing and importing of juices. *Federal Register*, 66, 6137-6202.
- Walker, G. M., & Stewart, G. G. (2016). *Saccharomyces cerevisiae* in the production of fermented beverages. *Beverages*, 2, 30, [10.3390/beverages2040030](https://doi.org/10.3390/beverages2040030).
- Wemekamp-Kamphuis, H. H., Karatzas, A. K., Wouters, J. A., & Abee, T. (2002). Enhanced levels of cold shock proteins in *Listeria monocytogenes* LO28 upon exposure to low temperature and high hydrostatic pressure. *Applied and Environmental Microbiology*, 68, 456-463, [10.1128/AEM.68.2.456-463.2002](https://doi.org/10.1128/AEM.68.2.456-463.2002).
- Wuytack, E. Y., Diels, A. M. J., & Michiels, C. W. (2002). Bacterial inactivation by high-pressure homogenisation and high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Microbiology*, 77, 205-212, [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00054-5).
- Yanez-Lopez, L., Domínguez, J., Fajardo, M. C., Malpica, F., Soriano, J., Pelayo, C., Armella, M. A., & Diaz de Leon, F. (2005). Quality attributes of different types of cactus pitaya fruits (*Stenocereus griseus*). *Acta Horticulturae*, 682, 645-650, [10.17660/ActaHortic.2005.682.83](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.83).

5. ALMACENAMIENTO REFRIGERADO DE JUGO DE PITAYA (*Stenocereus pruinosus*) TRATADO CON ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS

5.1. Resumen

La pitaya es una fruta jugosa de agradable sabor dulce, fresco y delicado, con propiedades antioxidantes; sin embargo, esta fruta tiene una corta vida de anaquel. Al respecto se ha observado la extensión de la vida de anaquel de jugos de frutas mediante la aplicación de altas presiones hidrostáticas (APH) a través de la inactivación microbiana y retención de compuestos bioactivos. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la APH sobre la microbiota nativa, actividad de la enzima pectinmetilesterasa (PME) y sobre la estabilidad fisicoquímica, nutraceútica y sensorial de jugo de pitaya tratado con APH y almacenado (60 d, $4 \pm 1^\circ\text{C}$). Jugo de pitaya se trató con 550 y 600 MPa durante 16 y 12 min, respectivamente; el análisis del efecto de los tratamientos durante el almacenamiento se realizó de acuerdo con un modelo mixto con medidas repetidas. La población de mesófilos aerobios fue inhibida totalmente ($2.87 \log_{10} \text{ UFC mL}^{-1}$) después del procesamiento con APH y las cuentas se mantuvieron por debajo de $2.0 \log_{10} (\text{UFC mL}^{-1})$. Los hongos y levaduras en los jugos tratados se mantuvieron totalmente inhibidos ($2.87 \log_{10} \text{ UFC mL}^{-1}$) hasta el final del almacenamiento. Después de la aplicación de presión a los jugos y durante su almacenamiento no se observaron cambios significativos en el contenido de sólidos solubles totales (SST, $9.8\text{-}10.00^\circ\text{Bx}$), índice de saturación de color ($18.87\text{-}20.74\%$) y comportamiento reológico (fluido pseudoplástico). Al final del almacenamiento, los jugos tratados con APH mostraron un incremento de la luminosidad (3 %) y decremento (84 %) de la actividad de la enzima PME. El contenido de ácido málico, compuestos fenólicos, betalaínas, actividad antioxidante y pH no fueron afectados por la APH, pero mostraron un decremento de 43, 10, 14, 6 y 0.6 %, respectivamente al final del almacenamiento. Finalmente, la aceptabilidad sensorial (5.2-6.3) de los jugos no fue afectada por la APH, pero los jugos almacenados mostraron la mayor (15 %) aceptabilidad. Por lo anterior, la APH es una alternativa viable para la producción de jugo de pitaya (sin acidificar) para su distribución refrigerada, con una vida de anaquel de 60 d.

Palabras clave: antioxidante, jugo fresco, calidad, inocuidad.

5.2. Introducción

La pitaya es una fruta producida por el árbol de pitayo, una cactácea columnar perteneciente al género *Stenocereus* (Bravo & Sánchez-Mejorada, 1991). La pitaya es una baya poliespermática pigmentada con forma redondeada u ovoide, y un exocarpo (cáscara) que posee areolas con espinas (Arnaud, Santiago, & Bautista, 1997; Buxbaum, 1961; Pimienta-Barrios & Nobel, 1994), las cuales son similares a pequeñas agujas, que proveen protección natural a la fruta (Quiroz-González *et al.*, 2018). La pulpa jugosa tiene un agradable sabor dulce, fresco y delicado (Yáñez-López *et al.*, 2005) con propiedades nutricionales y antioxidantes (García-Cruz *et al.*, 2016). Sin embargo, la pitaya es poco conocida, debido a que es comercializada principalmente en áreas cercanas a las zonas de producción, debido a su perecibilidad (Ochoa-Velasco & Guerrero Beltrán, 2013; García-Cruz, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & Luna-Morales, 2016). Se han estudiado algunas tecnologías emergentes (no térmicas) para la preservación de jugos de diversos frutos, tales como radiación, alta presión hidrostática, ozono, ultrasonido, gas inerte, plasma frío y membranas (Bevilacqua *et al.*, 2018), aunque existen sólo dos estudios donde aplican alguna de estas tecnologías en jugo de pitaya. Por ejemplo, Ochoa-Velasco & Guerrero-Beltrán (2012) y Ochoa-Velasco & Guerrero Beltrán (2013) lograron la reducción de la carga microbiana (mesófilos aerobios, hongos, levaduras y *Zygosaccharomyces bailii*) en jugo de pitaya tratado con radiación UV-C; estos autores reportaron una corta vida de anaquel (5 d) del jugo y la reducción del contenido de compuestos antioxidantes (betalaínas y compuestos fenólicos) durante el almacenamiento (25 d). Por otro lado, Sandate-Flores *et al.* (2017) trataron una bebida de piña-pitaya con APH (400-600 MPa, 2-10 min), estos autores reportaron la retención de betacianinas, incremento del contenido de vitamina C, pero un decremento del contenido de compuestos fenólicos y betaxantinas en los jugos tratados. No obstante, para asegurar la efectividad de estas tecnologías de procesamiento es necesaria la evaluación de las propiedades del jugo de pitaya durante el almacenamiento. Por lo anterior, los autores de la presente investigación previamente desarrollaron la evaluación de la letalidad de las APH sobre *L.*

innocua y *S. cerevisiae* (reducción de más de 5 log UFC mL⁻¹) (Quiroz-González *et al.*, 2018) en jugo de pitaya, debido a la importancia de estos microorganismos en la salud humana (Sokolowska *et al.*, 2014) y calidad sensorial (Walker y Stewart 2016; Martins, 2018) de los jugos; sin embargo, las características fisicoquímicas, nutraceúticas y sensoriales no han sido evaluadas en los jugos de pitaya tratados con los niveles de APH (550 y 600 MPa durante 16 y 12 min, respectivamente) que aseguran su inocuidad. Por lo tanto, el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la APH sobre la microbiota nativa, actividad de la enzima pectinmetilesterasa (PME) y sobre la estabilidad fisicoquímica, nutraceútica y sensorial de jugo de pitaya tratado con APH y almacenado (60 d, 4 ± 1°C).

5.3. Materiales y métodos

5.3.1. Material vegetal

Las pitayas (*Stenocereus pruinosus*, también conocida como “Pitaya de Mayo”) se cosecharon en madurez fisiológica en una plantación commercial de Santa Clara Huitziltepec, Puebla, México (Latitud: 18° 46 'N, Longitud: 97° 53' O). Después de la cosecha, las pitayas fueron almacenadas durante la noche a 12 ± 2 °C, con la finalidad de eliminar el calor de campo. Posteriormente las pitayas se transportaron al laboratorio vía transporte terrestre (approx. 12 h), adicionalmente se almacenaron a 16 ± 2 °C. Para la extracción del jugo, se removieron manualmente las espinas de las frutas, se desinfectaron con hipoclorito de sodio (0.05 % v/v) y finalmente, se removió la cáscara. El jugo de pitaya se extrajo con una despulpadora (MAPISA Polinox™, Agrícola industrial, Ciudad de México, México) equipada con un tamiz de 0.3 mm de diámetro de poro. Finalmente, el jugo de pitaya colectado (pH 5.2, 10 °Bx, y 9.5 % de sólidos) se envasó en bolsas para congelación (aprox. 1.5 L), se congeló (-20 °C) y se usó dentro de 4 meses.

5.3.2. Aplicación de APH

Muestras de jugo (15 mL) en bolsas de polietileno (Filmpack S.A. de C.V., Huejotzingo, Puebla, México) selladas al vacío fueron tratadas en un equipo de APH (Flow Autoclave Systems, 2 L, Columbus, OH, USA) con agua como medio

de presurización, a temperatura ambiente como condición inicial (20 °C). Las muestras fueron tratadas a 550 y 600 MPa por 16 y 12 min, respectivamente. Debido al calentamiento adiabático durante el tratamiento, las temperaturas de procesamiento oscilaron entre 26 y 33 °C. los jugos tratados se almacenaron durante 0, 5, 10, 15, 25, 30, 35, 45 y 60 d a 4 ± 1 °C (los jugos sin tratar sólo se almacenaron durante 0, 5, 10 y 15 d). Inmediatamente después de cada tratamiento se evaluó la microbiología, las propiedades fisicoquímicas y la actividad de la enzima pectinmetilesterasa. Las muestras de jugo para la evaluación fitoquímica, antioxidante y sensorial se almacenaron a -80 °C.

5.3.3. Efecto de APH sobre la microbiota nativa en el jugo

5 mL de jugo se diluyeron decimalmente en 45 mL de agua de peptonada al 0.1 % (w/v) (BD Bioxon, Becton Dickinson, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, Mexico), las diluciones subsecuentes consistieron en la dilución de 1 mL de la muestra diluída en mL 9 mL de agua peptonada al 0.1 %. Las diluciones de mesófilos aeróbios se inocularon en agar para cuenta estándar (BD Difco™, Sparks, MD) con la posterior incubación a 37 °C por 48 h. El conteo de hongos y levaduras se obtuvo en un medio de agar de papa y dextrosa (BD Bioxon, ajustado a un pH de 3.5 con ácido tartárico) incubado a 27 °C por 5 d (Leyva-Daniel, Escobedo-Avellaneda, Villalobos-Castillejos, Alamilla-Beltrán, & Welti-Chanes, 2017). Las diluciones de coliformes totales se inocularon en un medio de agar bilis rojo violeta (Merck, Darmstadt, Hesse) incubado a 37 °C por 24 h (Akgün & Ünlütürk, 2017). Los resultados fueron reportados como log (UFC mL⁻¹) y corresponden al promedio de seis repeticiones.

5.3.4. Efecto de la APH sobre la actividad de la enzima PME

La evaluación de la PME (EC 3.1.1.11) se realizó mediante el método propuesto por Sandate-Flores *et al.* (2017). El jugo de pitaya (10 g = m) se mezcló con 10 mL de una solución de pectina de cítricos (1 % p/v, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO) y una solución de NaCl (0.1 M, J.T. Baker, Luis I, Madrid). La mezcla se agitó a 200 rpm a 37 °C (placa caliente, CTR scientific, Monterrey, Nuevo León, Mexico). El pH de la mezcla se ajustó a 7.7 con NaOH (0.1 M, J.T. Baker) e

inmediatamente se agregaron 20 μL (v) de NaOH 0.1 M (c), se midió el tiempo de reacción (t) para mantener el pH (7.7). La actividad residual de la PME se calculó mediante las siguientes ecuaciones (Ec. 1 y 2):

$$\text{Actividad de PME} = \frac{c * v}{m * t} \quad \text{.....Ec. 1}$$

Porcentaje de actividad residual de PME (%)

$$= \frac{PME_{HHP}}{PME_0} * 100 \quad \text{.....Ec. 2}$$

PME_{HHP} = actividad de PME en muestra tratada

PME_0 = actividad inicial de PME en muestra sin tratar

Los resultados se reportaron como porcentaje de actividad residual de PME y corresponden al promedio de tres repeticiones.

5.3.5. Efecto de la APH sobre el comportamiento reológico del jugo

El comportamiento reológico del jugo de pitaya se determinó de acuerdo con el método descrito por Nindo *et al.* (2005) con un viscosímetro Anton Paar (Physica MCR 101 TruGap, Ostfildern, Deutschland) equipado con un peltier cilíndrico y geometría cónica (CP50-1 28724). La medición de esta variable se realizó en alícuotas de 17 mL de jugo a 20 ± 2 °C con un *gap* de 1.0 mm para la estabilización del equipo. Las curvas de flujo se registraron con un incremento de la tasa de corte desde 0.1 a 100 s^{-1} . La viscosidad aparente (μ , Pa · s), K= índice de consistencia (Pa · s^n) e índice de flujo (n) fueron descritos de acuerdo con la ley de potencia o modelo de *Ostwald-de-Waele* (Ec. 3).

$$\mu = K \cdot \gamma^{n-1} \quad \text{.....Ec. 3}$$

Dónde: γ = velocidad de corte (1/s) (Polydera, Stoforos, & Taoukis, 2005).

5.3.6. Efecto de la APH sobre pH, SST y contenido de ácido málico

El pH, los sólidos solubles totales, la humedad y el contenido de ácido málico del jugo de pitaya se midieron de acuerdo con los métodos 981.12, 932.12, 920.151 y 942.15 de la AOAC, respectivamente (AOAC, 1995).

5.3.7. Efecto de la APH sobre los parámetros de color

El cambio neto de color (CNC), ángulo de tono ($^{\circ}$), Luminosidad (%) e índice de saturación (%) se evaluó con la metodología propuesta por (McGuire, 1992) con un colorímetro Hunter Lab (MiniScan TM XE Plus No. 45/O-L, series 5348, Reston, VA). Los resultados de las propiedades fisicoquímicas corresponden al promedio de tres repeticiones.

5.3.8. Efecto de la APH sobre compuestos nutraceuticos y actividad antioxidante

Preparación del extracto metanólico

2 g de jugo se diluyeron en 8 mL de metanol (Sigma-Aldrich, 99.8 %), la solución obtenida se sonicó en un equipo de ultrasonido (BRANSON, 2510R-MTH, Gaithersburg, MD) a 5 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ durante 5 min y se centrifugó (centrifuga Thermo Scientific SL 16R, Osterode, Federated state of Lower Saxony) a 10062 g por 5 min (4 ± 2 $^{\circ}\text{C}$), el sobrenadante obtenido se denominó extracto metanólico, el cual fue empleado para el análisis de betalaínas, compuestos fenólicos y actividad antioxidante (AA).

Cuantificación de betalaínas

Para la evaluación de betalaínas se siguió el método empleado por Pérez-Loredo *et al.* (2015) adaptado a microplaca de 96 pozos. Del extracto metanólico diluido en una proporción 1:9 en agua tridestilada, se tomaron 300 μL para realizar la lectura de su absorbancia en un lector de microplacas (BioTek, Synergy HT, Winooski, VT) a las longitudes de onda de 535 y 483 nm para betacianinas y betaxantinas, respectivamente. La concentración de betacianinas y betaxantinas se determinó mediante la ecuación (Ec. 4) propuesta por García-Cruz *et al.* (2016):

$$\text{Betacianinas ó betaxantinas (mg g}^{-1}\text{ ps)} \quad \dots\dots\text{Ec. 4}$$

$$= (1000 \times A \times DF \times PM \times V) / (\epsilon \times P \times L)$$

Dónde: A= Absorbancia para cada pigmento, FD= Factor de dilución, PM = peso molecular (betacianina y betaxantina, 550 y 308 g mol⁻¹, respectivamente), V= volumen del extracto (mL), ε: coeficiente de extinción molar (betacianina y betaxantina, 60 000 y 48 000 L mol cm⁻¹, respectivamente), P= peso del jugo (g); L= longitud de la celda (cm). La evaluación se realizó por triplicado (cada repetición se evaluó por triplicado).

Cuantificación de compuestos fenólicos

La evaluación de los compuestos fenólicos se realizó con base en el método propuesto por Sánchez-Rangel *et al.* (2013). 15 µL del extracto metanólico, 15 µL de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich) (0.25 N) y 240 µL de agua tridestilada se colocaron en una microplaca y se mantuvo en oscuridad por 3 min. Posteriormente, a la mezcla se le adicionaron 30 µL de Na₂CO₃ (1N, J.T. Baker) y se mantuvo en oscuridad durante 2 h. Finalmente, se midió la absorbancia a 765 nm en un lector de microplacas. La concentración de los compuestos fenólicos totales se determinó mediante una curva estándar ($y = 0.3534x - 0.0159$; $R^2 = 0.9923$) de ácido gálico (GA, Sigma-Aldrich) (0.016 to 0.099 mg mL⁻¹). La evaluación se realizó por triplicado (cada repetición se evaluó por triplicado) y los resultados se expresaron como mg de ácido gálico g⁻¹ (ps).

Evaluación de la actividad antioxidante

La evaluación se realizó siguiendo el método de Villarreal-Lozoya *et al.* (2007) con modificaciones. En una microplaca se llevó a cabo la reacción entre 234 µL de una solución 160.7 µM del radical DPPH[•] (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl; Sigma-Aldrich) y 26 µL del extracto metanólico. Después de 15 min se midió la absorbancia de la mezcla a una longitud de onda de 515 nm. El valor final de absorbancia fue calculado con la siguiente ecuación (Ec. 5):

$$ABS = ABS_{muestra} - ABS_{blanco} \dots\dots\dots Ec. 6$$

Donde: ABS es el valor de la absorbancia final, $ABS_{muestra}$ es la absorbancia del extracto metanólico más el radical DPPH, y ABS_{blanco} es la absorbancia del blanco, la cual se realizó de manera similar a la muestra, pero en lugar de usar DPPH se mezclaron 234 μ L de metanol con el extracto metanólico. Para determinar la actividad antioxidante (AOX), se generó una curva estándar con Trolox (6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid; Sigma-Aldrich) a concentraciones desde 172.4 a 431 μ M. La AOX se calculó con la ecuación de la curva ($y = 698.98x - 7.6705$; $R^2 = 0.9922$) y se reportó como mM equivalentes de Trolox (TE)·g⁻¹ ps. Los resultados son el promedio de tres repeticiones.

5.3.9. Efecto de la APH sobre la aceptabilidad global de los jugos

La evaluación de aceptabilidad global de los jugos se realizó con 144 panelistas (edad: 18 - 33 años) mediante la aplicación de una escala hedónica de 9 puntos. Se evaluaron seis tratamientos: jugos tratados a 550 y 600 MPa durante 16 min (550 MPa-16 min) y 12 min (600 MPa-12 min), respectivamente y almacenados (4 ± 1 °C) durante 0, 15 y 60 d. Cada panelista evaluó tres tratamientos y un control (jugo sin tratar y sin almacenar).

5.3.10. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con un modelo mixto para medidas repetidas (Ec. 6), con una prueba Tukey (software Statistical Analysis System version 9, para Windows, SAS Institute Inc., Cary, NC).

$$y_{ijt} = \mu + \alpha_i + d_{j(i)} + \gamma_t + (\alpha\gamma)_{it} + e_{ijt} \dots\dots\dots Ec. 6$$

Donde: Y_{ijt} =respuesta medida en el tiempo t en la j -ésima repetición asignada al i -ésimo tratamiento, $Y_{ijt} \sim NI(0, \sigma_y^2)$ (con distribución normal independiente, con media 0 y varianza constante), μ =efecto de la media general, α_i =efecto fijo del

i -ésimo tratamiento, $d_{j(i)}$ =efecto aleatorio de la j -ésima repetición dentro del-ésimo tratamiento, $d_{j(i)} \sim NI(0, \sigma_d^2)$, Y_t = efecto fijo del t tiempo cuando se realizó la medición, $(\alpha\gamma)_{it}$ = efecto fijo de la interacción entre el tratamiento y el tiempo, e_{ijt} = error aleatorio asociado con la j -ésima repetición asignada al i -ésimo tratamiento en el tiempo t , $e_{ijt} \sim NID(0, \sigma_e^2)$. Bajo el supuesto que $d_{j(i)}$ y e_{ijt} son independientes (Wang & Goonewardene, 2004).

Para la determinación de las diferencias significativas por efecto de los tratamientos se usó una prueba de Friedman, la cual se basa en la distribución χ^2 (Ec. 7).

$$\chi^2 = \frac{12}{p(t)(t+1)} \sum_{j=1}^t x^2 \cdot j - [3(p)(t+1)] \quad \dots\dots\dots Ec. 7$$

Donde: p = número de panelistas, t = número de tratamientos comparados y x_j = suma de los ordenamientos del j -ésimo tratamiento. Los grados de libertad para $\chi^2 = t-1$. Posteriormente, para la comparación ($p = 0.05$) de las sumas de los tratamientos se determinó la mínima diferencia de ordenamiento significativa (MDOS) de acuerdo con la Ec. 8. Donde: $z_{\alpha/2}$ = es el valor crítico de la distribución normal con $\alpha/2$, p = número de panelistas y t = número de tratamientos comparados (Hernández-Montes, 2007; Valdivia-Nájara, Martín-Belloso, & Soliva-Fortuny, 2018).

$$MDOS = z_{\alpha/2} \sqrt{pt(t+1)/6} \quad \dots\dots\dots Ec. 8$$

5.4. Resultados y discusión

5.4.1. Effect of APH sobre la microbiota nativa en el jugo

Los jugos sin tratar mostraron un incremento de la población de mesófilos aerobios durante el almacenamiento; por lo tanto, después de los 15 d ya no se realizó la evaluación de las variables antes mencionadas. Los jugos tratados a los 60 d de almacenamiento presentaron diferencias significativas por efecto de las diferentes condiciones de APH. Los jugos con el tratamiento 550-16 mostraron un incremento significativo de la carga de mesófilos aeróbios a los 15

d de almacenamiento, mientras que los jugos con el tratamiento 600-12 mostraron un incremento de estos microorganismos hasta los 25 d. No obstante, al final del periodo de almacenamiento (60 d) el tratamiento 550-16 presentó una carga de microorganismos igual a la inicial (Figura 6), lo que indica que a mayor periodo de presurización del jugo, mayor fue la inactivación microbiana durante el almacenamiento (Guerrero-Beltran, Barbosa-Canovas, & Welte-Chanes, 2011; Bermúdez-Aguirre, Guerrero-Beltrán, Barbosa-Cánovas, & Welte-Chanes, 2011), este efecto pudo ser causado por una mayor eficiencia en la ruptura de la membrana celular debido a la desnaturalización de las proteínas y el cambio de fase (gel-líquido) de los lípidos que la componen (Cheftel, 1995; Huang *et al.*, 2014; Lado & Yousef, 2002). La carga de mesófilos aerobios observada (menor a 2 ciclos logarítmicos) a los 60 d podría asegurar, de acuerdo con la normatividad nacional (Secretaría-de-Salud, 1995), la inocuidad microbiológica de los jugos tratados.

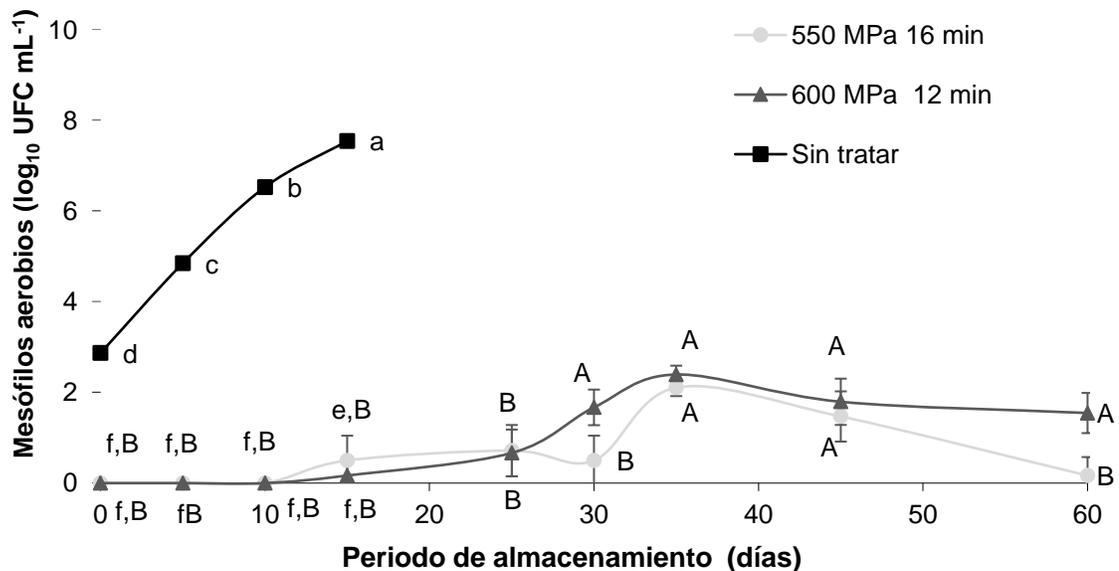


Figura 6. Supervivencia de la población de mesófilos aerobios en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C. Barras verticales indican la desviación estándar ($n = 6$); letras minúsculas indican la evaluación de todos los jugos durante 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados durante 60 d. No existe diferencia significativa entre las medias que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p = 0.05$).

Aunque la presencia de hongos y levaduras se asocian con el deterioro de alimentos altamente ácidos o acidificados (Marques da Silva & Evelyn, 2018); en el jugo de pitaya (sin tratar) la población de hongos y levaduras mostró un incremento significativo ($1.8 \log \text{ UFC mL}^{-1}$) durante el almacenamiento. En jugo de melón (pH 6.3) se observó un incremento de hasta $1 \log_{10}$ a los 10 d de almacenamiento (Fundo, Miller, Mandro, Tremarin, Brandão, & Silva, 2019), mientras que en jugos de piña, guayaba y mango (pH 3.6-4.5) sólo se ha reportado un aumento de la población de levaduras de $0.5 \log_{10}$ a las 24 h, con una reducción posterior hasta niveles no detectables (da Cruz Almeida, de Souza, de Sousa, Barbosa, de Sousa, Castellano, & de Souza, 2019). Lo que muestra que el pH tiene una participación importante en la conservación de los jugos.

Por otro lado, la aplicación de las APH en el jugo logró inactivar totalmente la carga de estos microorganismos, sin mostrar cambios durante los 60 d de almacenamiento (Cuadro 12).

Cuadro 12. Sobrevivencia de la población de hongos y levaduras en jugo de pitaya durante el almacenamiento a $4 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Periodo de almacenamiento	Log ₁₀ UFC mL ⁻¹ (media ± desviación estándar)		
	Sin tratar	550 MPa-16 min	600 MPa-12 min
0	2.83 ± 0.03 c ^z	Nd ^x	Nd
5	2.89 ± 0.05 b	Nd	Nd
10	4.55 ± 0.04 a	Nd	Nd
15	4.59 ± 0.08 a	Nd	Nd
25	-	Nd	Nd
30	-	Nd	Nd
35	-	Nd	Nd
45	-	Nd	Nd
60	-	Nd	Nd

^zNo existe diferencia significativa entre las medias que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$).

^xNd= No detectado.

5.4.2. Efecto de la APH sobre la actividad de la enzima PME

En los jugos sin tratar se observó una disminución significativa (58 %) de la actividad de la PME durante el almacenamiento. Sin embargo, los jugos tratados mostraron una disminución de la actividad enzimática mayor (59 – 63 %; $p=$

0.0001) después de la aplicación de las APH (Figura 7), actividad que alcanzó una actividad de 16 % a los 60 d de almacenamiento, posiblemente por la desnaturalización de la estructura terciaria o cuaternaria de la enzima debido a que el ingreso de agua causado por la APH (Buckow, 2018) indujo cambios conformacionales previos a su desnaturalización (Nash & Jonas, 1997; Saad-Nehme *et al.*, 2001).

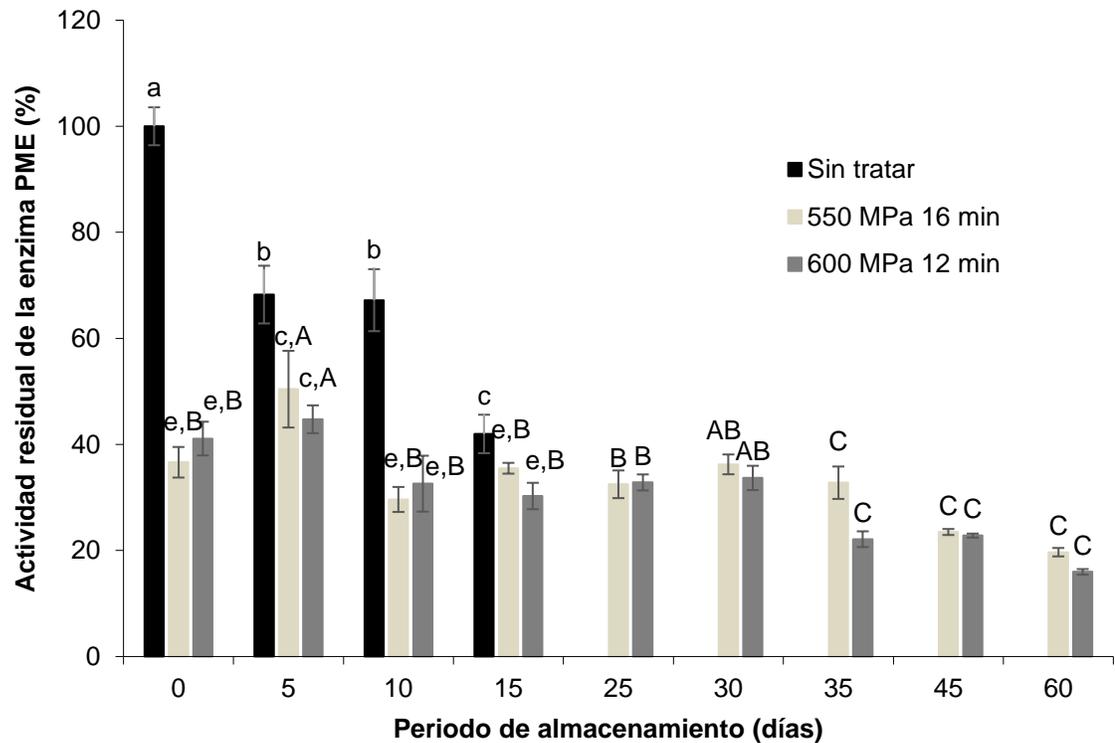


Figura 7. Cambios en la actividad residual de la enzima PME (%) en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C. Barras verticales indican la desviación estándar ($n = 6$). No existe diferencia significativa (en cada variable) entre los valores que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$). Letras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d.

La disminución de la actividad de esta enzima evita la pérdida de estabilidad de los jugos, dado que ésta se ha relacionado con la pérdida de turbidez en los jugos, característica indeseable para los consumidores (Liu, Zhao, Zou, & Hu, 2012; Sandate-Flores *et al.*, 2017). La elevada actividad de la enzima PME explica la pérdida de estabilidad del sistema coloidal de los jugos (disminución de

turbidez) mediante la hidrólisis de pectinas, co-precipitación de pectatos y su interacción con materiales insolubles presentes en jugos (iones Ca^{2+}) (Carbonell *et al.*, 2005), que consecuentemente se logra una separación de fases o floculación.

5.4.3. Efecto de la APH sobre el comportamiento reológico del jugo

La APH y el almacenamiento no causaron un efecto significativo sobre la viscosidad aparente (μ , modelo Ostwald-de-Waele, $R^2 > 95\%$, Figura 8) del jugo de pitaya; tampoco fueron afectados el índice de flujo (n , 0.43 - 0.51, $n < 1$, Apéndice 6.1, Cuadro 27) y el índice de consistencia (K , 5.19 - 8.95 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$, $K > 0$, Apéndice 6.1, Cuadro 27). De acuerdo con lo anterior, el comportamiento reológico del jugo de pitaya presentó las características de un fluido pseudoplástico, tal como lo ha reportado Moussa-Ayoub *et al.* (2017) en jugo de tuna (*O. dillenii*). Estos resultados permitieron suponer que algunos componentes (fibra, pectina, mucilago y otros hidrocoloides) presentes en los frutos de algunas cactáceas (tuna y pitaya) (Moussa-Ayoub *et al.*, 2017; García-Cruz *et al.*, 2013; Mercado & Granados, 2002) no fueron afectados por las APH y se mantuvieron estables durante el almacenamiento.

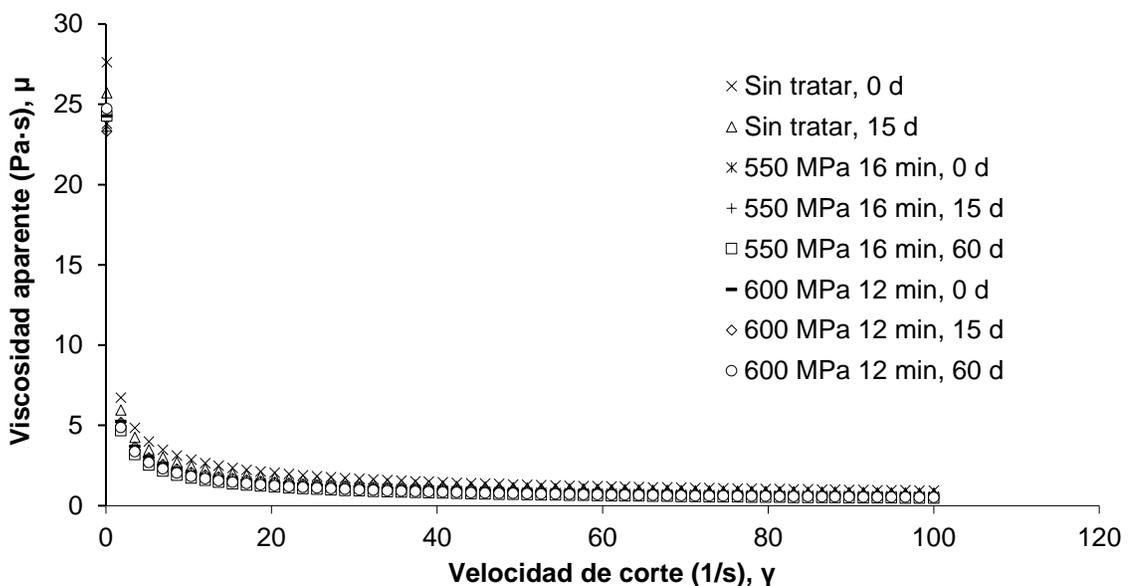


Figura 8. Viscosidad aparente de jugo de pitaya tratado con 550 y 600 MPa durante 16 y 12 min, respectivamente, y almacenado por 0, 15 y 60 d ($4 \pm 1^\circ\text{C}$).

5.4.4. Efecto de la APH sobre pH, SST y contenido de ácido málico

La aplicación de APH no mostró efecto sobre ($p < 0.05$) el pH, SST y contenido de ácido málico en el jugo, y aunque el periodo de almacenamiento causó la disminución del pH (5.25 a 5.22, Apéndice 6.1, Cuadro 28), esta disminución fue irrelevante. Tampoco, los SST fueron afectados significativamente ($10 - 9.93$ °Bx, Apéndice 6.1, Cuadro 28) por efecto del almacenamiento; sin embargo, el contenido de ácido málico disminuyó hasta alcanza una pérdida de 43 % al día 60 (Cuadro 13). Al respecto, se ha reportado la disminución del contenido de algunos ácidos orgánicos (málico, ascórbico y cítrico) durante el almacenamiento de jugos de algunos frutos (manzana, naranja, uva y fresa) (Juarez-Enriquez, Salmeron-Ochoa, Gutierrez-Mendez, Ramaswamy, & Ortega-Rivas, 2015; Mezey & Mezeyová, 2018; Garcia *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2012) como se observó en el jugo de pitaya del presente estudio.

Cuadro 13. Cambios del contenido de ácido málico en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media \pm desviación estándar).

Día	Ácido málico (%)		
	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
0	0.14 \pm 0.01 a	0.14 \pm 0.01 a,A ^z	0.15 \pm 0.01 a,A
5	0.11 \pm 0.0 b	0.11 \pm 0.01 b,B	0.10 \pm 0.01 b,B
10	0.10 \pm 0.01 c	0.10 \pm 0.01 c,C	0.10 \pm 0.01 c,C
15	0.09 \pm 0.00 d	0.08 \pm 0.00 d,D	0.08 \pm 0.00 d,D
25	-	0.08 \pm 0.00 D	0.08 \pm 0.00 D
30	-	0.07 \pm 0.00 D	0.08 \pm 0.00 D
35	-	0.08 \pm 0.00 D	0.08 \pm 0.00 D
45	-	0.07 \pm 0.00 D	0.07 \pm 0.00 D
60	-	0.08 \pm 0.00 D	0.08 \pm 0.00 D

^zNo existe diferencia significativa entre las medias que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$). Letras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d.

5.4.5. Efecto de la APH sobre los parámetros de color

La aplicación de la APH (550 MPa-16 min and 600 MPa-12 min) en el jugo de pitaya no causó CNC ($p > 0.05$), sin embargo, el periodo de almacenamiento provocó un incremento ($p = 0.0001$) de éste. Algunos autores (Cao *et al.*, 2012; Bull *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2016) han reportado la estabilidad del color en jugos

tratados con APH; sin embargo, tal como se observó en este trabajo, también se ha reportado un efecto negativo del almacenamiento, por ejemplo, en jugo de fresa tratado con 600 MPa por 4 min se observaron 4.8 unidades de CNC a los 60 d de almacenamiento (4 °C) (Cao *et al.*, 2012); en jugo de naranja tratado con 600 MPa (1 min) y almacenado por 30 d (4 °C) se han reportado 5.52 unidades de CNC (Bull *et al.*, 2004) y en jugo de mora tratado con 500 MPa (5 min), se han observado CNC de 1.38 unidades a los 28 d de almacenamiento (4 °C) (Zou *et al.*, 2016). En los jugos del presente estudio se observó un máximo de 2.24 unidades de CNC (Cuadro 14).

Consistentemente con los resultados de la variable CNC; los parámetros: ángulo de tono, luminosidad e índice de saturación no fueron afectados ($p > 0.05$) por el procesamiento con APH. Sin embargo, todos los jugos (tratados y sin tratar) mostraron un aumento significativo ($p = 0.0001$) del ángulo de tono conforme se incrementó el periodo de almacenamiento (Cuadro 14), con una pérdida de la tonalidad roja, posiblemente por la pérdida de pigmentos; estos cambios podrían explicarse por enzimas y/o microorganismos aún presentes a pesar de los tratamientos (Oey, Lille, Van Loey, & Hendrickx, 2008).

La luminosidad y el índice de saturación mostraron cambios ($p > 0.05$) por efecto del almacenamiento, los jugos sin tratar mostraron una disminución de la luminosidad de 4.2 a 3.4°, e índice de saturación de 19.8 a 18.6 (Apéndice 6.1, Cuadro 29), mientras que la reducción de la luminosidad (4.3 a 4.4 %, Apéndice 6.1, Cuadro 29) e índice de saturación (19.9 a 20.3, Apéndice 6.1, Cuadro 27) en jugos tratados fue irrelevante, lo que significa que los jugos tratados mostraron un color más brillante y también mantuvieron su intensidad de color durante el almacenamiento refrigerado.

5.4.6. Efecto de la APH sobre compuestos nutraceuticos y actividad antioxidante

En todos los jugos (tratados y sin tratar) no se afectó ($p > 0.05$) el contenido de betalaínas, las cuales comprenden a las betacianinas (rojas) y a las betaxantinas (amarillas, Khan & Giridhar, 2015). Pero a diferencia de las betaxantinas (21.1 -

18.9 mg g⁻¹ bs, Apéndice 6.1, Cuadro 30), sólo las betacianinas mostraron una disminución significativa (28 %) por efecto del periodo de almacenamiento (Cuadro 15). Al respecto, Ochoa-Velasco & Guerrero-Beltrán, 2012) reportaron una disminución de 25 % en jugo de pitaya (*Stenocereus griseus*) tratado con luz UV-C y almacenado durante 25 d a 4 °C a la observada en el presente estudio.

Cuadro 14. Cambio neto de color y ángulo de tono en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media \pm desviación estándar).

Día	Cambio neto de color			Ángulo de tono (°)		
	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
0	0.10 \pm 0.06 e	0.14 \pm 0.01 e,D ²	0.14 \pm 0.04 e,D	10.0 \pm 0.1 c	10.1 \pm 0.2 c,E	10.1 \pm 0.2 c,E
5	1.10 \pm 0.05 c	0.57 \pm 0.11 de,D	0.45 \pm 0.18 de,D	10.8 \pm 0.3 b	10.6 \pm 0.1 b,D	10.7 \pm 0.3 b,D
10	1.41 \pm 0.41 bc	0.57 \pm 0.23 de,D	0.37 \pm 0.03 de,D	11.1 \pm 0.1 a	11.1 \pm 0.1 a,D	11.1 \pm 0.1 a,D
15	1.33 \pm 0.04 bc	1.67 \pm 0.08 a,B	1.61 \pm 0.04 ab,B	11.8 \pm 1.4 ab	11.8 \pm 0.2 ab,B	11.5 \pm 0.1 ab,B
25	-	1.58 \pm 0.23 B	1.58 \pm 0.11 B	-	14.2 \pm 0.4 C	14.7 \pm 0.2 C
30	-	1.77 \pm 0.29 B	1.54 \pm 0.08 B	-	14.6 \pm 0.4 C	14.8 \pm 0.3 C
35	-	2.00 \pm 0.39 AB	2.13 \pm 0.38 AB	-	15.1 \pm 0.2 B	15.5 \pm 0.5 B
45	-	2.10 \pm 0.45 AB	1.94 \pm 0.29 AB	-	15.7 \pm 0.2 B	15.4 \pm 0.2 B
60	-	2.24 \pm 0.30 A	2.07 \pm 0.11 A	-	16.3 \pm 0.3 A	16.3 \pm 0.1 A

²No existe diferencia significativa (en cada variable) entre las medias que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$). Letras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d.

La disminución de los contenidos de estos pigmentos coincide con el incremento de *hue* durante el almacenamiento, es decir, con una pérdida de la tonalidad roja (Cuadro 14). Las betalaínas comprenden a las betacianinas (rojo) y betaxantinas (amarillos), pigmentos identificados principalmente en la familia de Caryophyllales y Cactaceae que a diferencia de otros pigmentos (antocianinas) son estables a valores de pH próximos a 5 (Jiménez-Aguilar *et al.*, 2015) similares al jugo de pitaya estudiado. Otro factor que pudo degradar a estos pigmentos podría ser la presencia de algunas enzimas residuales como β -glucosidasas, peroxidasas y polifenoloxidasas (Stintzing & Carle, 2004), que han mostrado un reducción máxima de 53 % cuando son sometidas a las APH (García-Palazon *et al.*, 2004; Morales-de la Peña, Salinas-Roca, Escobedo-Avellaneda, Martín-Belloso, & Welti-Chanes, 2018). Al respecto, Azeredo (2009) reportó que las betacianinas son más susceptibles a degradarse por la actividad enzimática que las betaxantinas, durante el almacenamiento.

El contenido de compuestos fenólicos totales en todos los jugos no se afectó por la aplicación de las APH en los primeros días de almacenamiento. Sin embargo, en los jugos presurizados se observó una disminución de 10 % después de los 45 d de almacenamiento (Cuadro 16). Esta disminución es similar (13 %) a la encontrada en jugo de pitaya después de la aplicación de luz UV-C. Se han reportado disminuciones mayores en jugo de granada y kiwi (19 y 30 %, respectivamente) tratados con 550 MPa (2.5 y 10 min, respectivamente) y almacenados durante 35 y 42 d, respectivamente (Varela-Santos *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2018). Es importante señalar que los contenidos de los compuestos bioactivos (betalaínas y fenoles) no se afectaron con la aplicación de APH pero sí por efecto del almacenamiento.

Cuadro 15. Cambios en el contenido de betalaínas totales y betacianinas ($\text{mg g}^{-1} \text{bs}^z$) en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media \pm desviación estándar).

Día	Betalaínas			Betacianinas		
	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
0	42.7 \pm 2.7 a	40.8 \pm 1.8 a,A ^y	40.6 \pm 1.0 a,A	21.5 \pm 0.9 a	20.7 \pm 1.0 a,A	21.1 \pm 0.3 a,A
5	43.4 \pm 2.2 a	40.8 \pm 1.4 a,A	39.2 \pm 4.1 a,A	21.9 \pm 1.1 a	20.6 \pm 0.7 a,AB	19.8 \pm 2.0 a,AB
10	42.1 \pm 2.9 a	41.7 \pm 1.2 a,A	41.1 \pm 1.3 a,A	21.2 \pm 1.4 a	20.9 \pm 0.6 a,A	20.7 \pm 0.6 a,A
15	41.3 \pm 2.2 a	41.9 \pm 1.0 a,A	40.5 \pm 0.6 a,A	20.8 \pm 1.1 a	21.1 \pm 0.6 a,A	20.9 \pm 0.2 a,A
25	-	39.8 \pm 1.0 A	40.1 \pm 2.0 A	-	19.2 \pm 0.3 BC	19.4 \pm 1.0 BC
30	-	39.2 \pm 1.7 A	40.2 \pm 2.0 A	-	18.9 \pm 0.8 BC	19.0 \pm 1.3 BC
35	-	37.2 \pm 1.0 B	36.2 \pm 2.7 B	-	17.4 \pm 0.1 CD	17.3 \pm 1.5 CD
45	-	36.1 \pm 1.5 B	35.9 \pm 1.5 B	-	16.9 \pm 0.6 D	16.9 \pm 1.1 D
60	-	35.6 \pm 2.5 B	35.0 \pm 0.6 B	-	16.4 \pm 1.2 D	15.8 \pm 0.2 D

^zbs= base seca.

^yNo existe diferencia significativa (en cada variable) entre las medias que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$). Letras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d.

La actividad antioxidante no fue afectada significativamente por la aplicación de la APH en los jugos, no obstante, esta fue afectada por el almacenamiento, los jugos sin tratar mostraron una reducción significativa (9%) a los 15 d de almacenamiento, mientras que en los jugos tratados este decremento (hasta 6%) se observó después de los 30 d de almacenamiento (Cuadro 16). La actividad antioxidante observada en los jugos podría deberse al contenido de compuestos fenólicos y betalaínas totales, los cuales mostraron disminución significativa a los 35 y 45 d de almacenamiento, respectivamente. Aunque habría también que considerar el efecto sinérgico de la presencia de algunos ácidos orgánicos como el ácido málico y el ácido cítrico (Ramírez-Ramos *et al.* 2015; García-Cruz *et al.* 2017), el último no evaluado en este trabajo. Al respecto, algunos estudios informaron el efecto negativo del almacenamiento en los jugos; Cao *et al.* (2012) y Juárez-Enriquez *et al.* (2015) reportaron una disminución de 8 y 6 % de la actividad antioxidante en jugo de fresa tratado con 600 MPa durante 4 min (60 d de almacenamiento) y en jugo de manzana 430 MPa durante 7 min (34 d de almacenamiento), respectivamente.

5.4.7. Efecto de la APH sobre la aceptabilidad global de los jugos

Los panelistas calificaron la aceptabilidad global de los jugos de acuerdo con una escala hedónica de 9 puntos con valores entre 5.5 y 6.3. En general, los jugos con mayor aceptabilidad fueron los almacenados (excepto los jugos tratados con 550 MPa por 16 min). Es posible que la aceptabilidad estuviera influida por el menor contenido de ácido málico en los jugos, por lo tanto menor acidez, y consecuentemente los panelistas percibieran un mayor dulzor (Cuadro 17) (Mezey & Mezeyová, 2018).

Cuadro 16. Cambios en el contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C (media \pm desviación estándar).

Día	Compuestos fenólicos totales (mg de ácido gálico g ⁻¹ bs ²)			Actividad antioxidante (mM equivalentes de Trolox g ⁻¹ bs)		
	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
0	0.40 \pm 0.01 a	0.40 \pm 0.01 a,A	0.40 \pm 0.01 a,A	2.69 \pm 0.06 a	2.72 \pm 0.03 a,A	2.67 \pm 0.06 a,A
5	0.40 \pm 0.00 a	0.40 \pm 0.01 A,a	0.41 \pm 0.01 a,A	2.60 \pm 0.12 a	2.69 \pm 0.06 a,A	2.68 \pm 0.03 a,A
10	0.40 \pm 0.02 a	0.40 \pm 0.01 a,A	0.40 \pm 0.02 a,AB	2.59 \pm 0.10 a	2.68 \pm 0.08 a,A	2.68 \pm 0.09 a,A
15	0.39 \pm 0.01 a	0.41 \pm 0.01 a,A	0.40 \pm 0.01 a,A	2.46 \pm 0.03 c	2.60 \pm 0.06 b,A	2.66 \pm 0.08 b,A
25	-	0.40 \pm 0.01 A	0.39 \pm 0.01 A	-	2.63 \pm 0.04 A	2.64 \pm 0.04 A
30	-	0.40 \pm 0.01 A	0.39 \pm 0.02 A	-	2.60 \pm 0.06 B	2.52 \pm 0.04 B
35	-	0.38 \pm 0.02 AB	0.37 \pm 0.02 AB	-	2.54 \pm 0.05 B	2.54 \pm 0.01 B
45	-	0.37 \pm 0.02 B	0.36 \pm 0.02 B	-	2.55 \pm 0.08 B	2.56 \pm 0.06 B
60	-	0.36 \pm 0.02 B	0.37 \pm 0.00 B	-	2.59 \pm 0.09 B	2.58 \pm 0.06 B

²bs= base seca.

³No existe diferencia significativa (en cada variable) entre las medias que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$). Letras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d.

Cuadro 17. Cambios en la aceptabilidad del jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C.

Presión (MPa)	Tiempo de almacenamiento (d)		
	0	15	60
0	5.57 c ^z	---	---
550	5.51 c	6.25 a	5.76 cb
600	5.17 c	6.33 a	5.96 cb

^zMedias que comparten la misma letra indican que no existe diferencia significativa, de acuerdo con la mínima diferencia de ordenamiento significativa (MDOS, $p > 0.05$).

5.5. Conclusiones

Los jugos tratados con 550 y 600 MPa durante 16 y 12 min, respectivamente, y almacenados hasta 60 d mantuvieron la carga microbiana por debajo de 2 ciclos logarítmicos y mayor vida de anaquel que el jugo natural (sin aplicación de APH). El índice de saturación de color, SST y el comportamiento reológico no se afectaron por las APH, tampoco por el tiempo de almacenamiento. Sin embargo, con la aplicación de APH se observó incremento de luminosidad y una disminución de la actividad de la enzima PME en los jugos. El contenido de ácido málico, compuestos fenólicos, betalainas y actividad antioxidante no se afectaron por la aplicación de APH, pero el almacenamiento disminuyó sus contenidos, así como el pH. La aceptabilidad sensorial no resultó afectada por las APH, pero fue favorecida por el almacenamiento al presentar menor acidez. Las altas presiones podrían ser una alternativa para la obtención de jugos con mayor vida de anaquel con calidad nutracéutica.

5.6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional Mexicano de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de doctorado (265456) otorgada a la autora Quiroz-González; al Tecnológico de Monterrey (fondos de la cátedra de investigación GEE1A01001 y CDB081) y a la Universidad Autónoma Chapingo (Proyecto convencional 17076-C 2017) por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

5.7. Literatura citada

Akgün, M. P., & Ünlütürk, S. (2017). Effects of ultraviolet light emitting diodes (LEDs) on microbial and enzyme inactivation of apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 260, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.08.007>.

AOAC. (1995). *Official Methods of Analysis* (16th ed.). Washington, DC: AOAC International.

Arnaud, V. R., Santiago, G. P., & Bautista, P. B. (1997). Agroindustria de algunos frutos. In: Rodríguez, P. L (Ed.), *Suculentas Mexicanas Cactáceas*. México: CVS Publishers.

Azeredo, H. M. C. (2009). Betalains: Properties, sources, applications, and

- stability - A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(12), 2365–2376, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>.
- Bermúdez-Aguirre, D., Guerrero-Beltrán, J. Á., Barbosa-Cánovas, G. V., & Welti-Chanes, J. (2011). Study of the inactivation of *Escherichia coli* and pectin methylesterase in mango nectar under selected high hydrostatic pressure treatments. *Food Science and Technology International*, 17, 541–547, <https://doi.org/10.1177/1082013211399681>.
- Bevilacqua, A., Petruzzi, L., Perricone, M., Speranza, B., Campaniello, D., Sinigaglia, M., & Corbo, M. A. (2018). Nonthermal Technologies for Fruit and Vegetable Juices and Beverages: Overview and Advances. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17, 1–62, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12299>.
- Bravo, H. H., & Sánchez-Mejorada, H. (1991). *Las Cactáceas de México* (3rd ed.). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Brockington, S. F., Yang, Y., Gandia-Herrero, F., Covshoff, S., Hibberd, J. M., Sage, R. F., ... Smith, S. A. (2015). Lineage-specific gene radiations underlie the evolution of novel betalain pigmentation in Caryophyllales. *New Phytologist*, 207, 1170–1180, <https://doi.org/10.1111/nph.13441>.
- Buckow, T. (2018). High-Pressure Processing Effects on Endogenous Enzymes in Fruits and Vegetables. In Houska M., & Marques da Silva F. V. (Eds.), *High Pressure Processing of Fruit and Vegetable Products*. U.S.: CRC Press.
- Bull, M. K., Zerdin, K., Howe, E., Goicoechea, D., Paramanandhan, P., Stockman, R., ... Stewart, C. M. (2004). The effect of high pressure processing on the microbial, physical and chemical properties of Valencia and Navel orange juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, 135–149, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.11.005>
- Buxbaum, F. (1961). Die entwicklungslinien der tribes Pachycereeae F. Buxb. (Cactaceae-Cereoideae). *Botanical Studies*, 12, 1–107.
- Cao, X., Bi, X., Huang, W., Wu, J., Hu, X., & Liao, X. (2012). Changes of quality of high hydrostatic pressure processed cloudy and clear strawberry juices during storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 181–190, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.05.008>.
- Chang, Y.-H., Wu, S.-J., Chen, B.-Y., Huang, H.-W., & Wang, C.-Y. (2017). Effect of high pressure processing and thermal pasteurization on overall quality parameters of white grape juice. *Science of Food and Agriculture*, 97, 3166–3172, <https://doi.org/10.1002/j>.
- Cheftel, J. C. (1995). Review: High-pressure, microbial inactivation and food preservation. *Food Science and Technology International*, 1, 75–90, <https://doi.org/10.1177/108201329500100203>.
- da Cruz Almeida, E. T., de Souza, G. T., de Sousa Guedes, J. P., Barbosa, I. M., de Sousa, C. P., Castellano, L. R. C., ... & de Souza, E. L. (2019). *Mentha*

- piperita* L. essential oil inactivates spoilage yeasts in fruit juices through the perturbation of different physiological functions in yeast cells. *Food Microbiology*, 82, 20-29, <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.01.023>.
- Fundo, J. F., Miller, F. A., Mandro, G. F., Tremarin, A., Brandão, T. R., & Silva, C. L. (2019). UV-C light processing of Cantaloupe melon juice: Evaluation of the impact on microbiological, and some quality characteristics, during refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology*, 103, 247-252, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.025>.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, Chemical, and Antioxidant Activity Characterization of Pitaya (*Stenocereus pruinosus*) Fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68, 403–410, <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0391-8>.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Luna-Morales, C. del C. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69–76, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.004>.
- Garcia-Palazon, A., Suthanthangjai, W., Kajda, P., & Zabetakis, I. (2004). The effects of high hydrostatic pressure on β -glucosidase, peroxidase and polyphenoloxidase in red raspberry (*Rubus idaeus*) and strawberry (*Fragaria x ananassa*). *Food Chemistry*, 88, 7–10, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.019>.
- Garcia, E. F., de Oliveira Araújo, A., Luciano, W. A., de Albuquerque, T. M. R., de Oliveira Arcanjo, N. M., Madruga, M. S., ... de Souza, E. L. (2018). The performance of five fruit-derived and freeze-dried potentially probiotic *Lactobacillus* strains in apple, orange, and grape juices. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 5000–5010, <https://doi.org/10.1002/jsfa.9034>.
- Guerrero-Beltrán, J. A., Barbosa-Canovas, G. V., & Welti-Chanes, J. (2011). High hydrostatic pressure effect on natural microflora, *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli*, and *Listeria Innocua* in navel orange juice. *International Journal of Food Engineering*, 7, 1–16, <https://doi.org/10.2202/1556-3758.2166>.
- Hernández-Montes, A. (2007). *Evaluación sensorial de productos agroalimentarios*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Huang, H. W., Lung, H. M., Yang, B. B., & Wang, C. Y. (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. *Food Control*, 40, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.12.007>.
- Jiménez-Aguilar, D. L., Escobedo-Avellaneda, Z., Martín-Belloso, O., Gutiérrez-Urbe, J., Valdez-Fragoso, A., García-García, R., ... Welti-Chanes, J. (2015). Effect of High Hydrostatic Pressure on the Content of Phytochemical Compounds and Antioxidant Activity of Prickly Pears (*Opuntia ficus-indica*) Beverages. *Food Engineering Reviews*, 7, 198–208.

<https://doi.org/10.1007/s12393-015-9111-5>

- Juarez-Enriquez, E., Salmeron-Ochoa, I., Gutierrez-Mendez, N., Ramaswamy, H. S., & Ortega-Rivas, E. (2015). Shelf life studies on apple juice pasteurised by ultrahigh hydrostatic pressure. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 915–919, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.041>.
- Khan, M. I., & Giridhar, P. (2015). Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*, 117, 267–295, <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.06.008>.
- Lado, B. H., & Yousef, A. E. (2002). Alternative food-preservation technologies: Efficacy and mechanisms. *Microbes and Infection*, 4, 433–440, [https://doi.org/10.1016/S1286-4579\(02\)01557-5](https://doi.org/10.1016/S1286-4579(02)01557-5).
- Leyva-Daniel, D. E., Escobedo-Avellaneda, Z., Villalobos-Castillejos, F., Alamilla-Beltrán, L., & Welti-Chanes, J. (2017). Effect of high hydrostatic pressure applied to a Mexican honey to increase its microbiological and functional quality. *Food and Bioprocess Technology*, 102, 299–306, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.01.001>.
- Liu, Y., Zhao, X. Y., Zou, L., & Hu, X. S. (2012). Effect of high hydrostatic pressure on overall quality parameters of watermelon juice. *Food Science and Technology International*, 19, 197–207, <https://doi.org/10.1177/1082013212442194>.
- Marques da Silva, F. V., & Evelyn. (2018). High-Pressure Processing Effect on Microorganisms in Fruit and Vegetable Products. In Houska M., & Marques da Silva F. V. (Eds.), *High Pressure Processing of Fruit and Vegetable Products*. U.S.: CRC Press.
- Martins S., B. de C. (2018). Pathogens and Spoilage Microorganisms in Fruit Juice: An Overview. In Rajauria G., & Tiwari B. K. (Eds.), *Fruit juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis*. UK: Elsevier.
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27, 1254–1255.
- Mercado, J., & Granados, D. (2002). *La pitaya. Biología, Ecología, Fisiología Sistemática, Etnobotánica*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Mezey, J., & Mezeyová, I. (2018). Changes in the levels of selected organic acids and sugars in apple juice after cold storage. *Czech Journal of Food Sciences*, 36, 2–7, <https://doi.org/10.17221/165/2017-CJFS>.
- Morales-de la Peña, M., Salinas-Roca, B., Escobedo-Avellaneda, Z., Martín-Belloso, O., & Welti-Chanes, J. (2018). Effect of High Hydrostatic Pressure and Temperature on Enzymatic Activity and Quality Attributes in Mango Puree Varieties (cv. Tommy Atkins and Manila). *Food and Bioprocess Technology*, 11, 1211–1221, <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2090-9>.
- Moussa-Ayoub, T. E., Jäger, H., Knorr, D., El-Samahy, S. K., Kroh, L. W., & Rohn, S. (2017). Impact of pulsed electric fields, high hydrostatic pressure, and

- thermal pasteurization on selected characteristics of *Opuntia dillenii* cactus juice. *LWT - Food Science and Technology*, 79, 534–542, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.061>.
- Nash, D. P., & Jonas, J. (1997). Structure of Pressure-Assisted Cold Denatured Lysozyme and Comparison with Lysozyme Folding Intermediates Structure of Pressure-Assisted Cold Denatured Lysozyme and Comparison with. *Solutions*, 2960, 14375–14383, <https://doi.org/10.1021/bi970881v>.
- Nindo, C. I., Tang, J., Powers, J. R., & Singh, P. (2005). Viscosity of blueberry and raspberry juices for processing applications. *Journal of Food Engineering*, 9, 343–350, doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.08.025.
- Ochoa-Velasco, C. E., & Guerrero-Beltrán, J. Á. (2012). Ultraviolet-C Light Effect on Pitaya (*Stenocereus griseus*) Juice. *Journal of Food Research*, 1, 60–70, <https://doi.org/10.5539/jfr.v1n2p60>.
- Ochoa-Velasco, C. E., & Guerrero Beltrán, J. Á. (2013). Short-wave ultraviolet-C light effect on pitaya (*Stenocereus griseus*) juice inoculated with *Zygosaccharomyces bailii*. *Journal of Food Engineering*, 117, 34–41, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.020>.
- Oey, I., Lille, M., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2008). Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit-and vegetable-based food products: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19, 320–328, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.04.001>.
- Park, H. J., Bae, J. H., Ko, H. J., Lee, S. H., Sung, B. H., Han, J. I., & Sohn, J. H. (2018). Low-pH production of d-lactic acid using newly isolated acid tolerant yeast *Pichia kudriavzevii* NG7. *Biotechnology and Bioengineering*, 115, 2232–2242. <https://doi.org/10.1002/bit.26745>.
- Pérez-Loredo, M. G., García-Ochoa, F., & Barragán-Huerta, B. E. (2016). Comparative Analysis of Betalain Content in *Stenocereus Stellatus* Fruits and Other Cactus Fruits Using Principal Component Analysis. *International Journal of Food Properties*, 19, 326–338, <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1022259>.
- Pimienta-Barrios, E., & Nobel, P. S. (1994). Pitaya (*Stenocereus* spp., cactaceae): an ancient and modern fruit crop of Mexico. *Economic Botany*, 48, 76–83.
- Polydera, A. C., Stoforos, N. G., & Taoukis, P. S. (2005). Quality degradation kinetics of pasteurised and high pressure processed fresh Navel orange juice: Nutritional parameters and shelf life. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6, 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.10.004>.
- Quiroz-González, B., García-Mateos, M. del R., Corrales-García, J., & Colinas-León, M. T. B. (2018). Pitaya (*Stenocereus* spp.): an under-utilized fruit. *Journal of the Profesional Association for Cactus Development*, 20, 82-

- Saad-Nehme, J., Silva, J. L., & Meyer-Fernandes, J. R. (2001). Osmolytes protect mitochondrial F₀F₁-ATPase complex against pressure inactivation. *Biochimica et Biophysica Acta - Protein Structure and Molecular Enzymology*, 1546, 164–170, [https://doi.org/10.1016/S0167-4838\(01\)00137-6](https://doi.org/10.1016/S0167-4838(01)00137-6).
- Sánchez-Rangel, J. C., Benavides, J., Heredia, J. B., Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2013). The Folin-Ciocalteu assay revisited: Improvement of its specificity for total phenolic content determination. *Analytical Methods*, 5, 5990–5999, <https://doi.org/10.1039/c3ay41125g>.
- Sandate-Flores, L., Rostro-Alanis, M. de J., Mancera-Andrade, E. I., Esquivel-Hernandez, D. A., Brambila-Paz, C., Parra-Saldívar, R., ... Rodríguez-Rodríguez, J. (2017). Using high hydrostatic pressures to retain the antioxidant compounds and to reduce the enzymatic activity of a pitaya-pineapple (*Stenocereus sp.-Fragaria ananassa*) beverage. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 611–619, <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2482-7>.
- Secretaría-de-Salud. (1995). *NOM-130-SSA1-1995. Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias*. México: Secretaría de Salud.
- Sokołowska, B., Skąpska, S., Niezgoda, J., Rutkowska, M., Dekowska, A., & Rzoska, S. J. (2014). Inactivation and sublethal injury of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* by high hydrostatic pressure in model suspensions and beetroot juice. *High Pressure Research*, 34, 147–155, <https://doi.org/10.1080/08957959.2013.877458>.
- Stintzing, F. C., & Carle, R. (2004). Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in Food Science and Technology*, 15, 19–38, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.004>.
- Valdivia-Nájar, C. G., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2018). Impact of pulsed light treatments and storage time on the texture quality of fresh-cut tomatoes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, 29–35, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.007>.
- Varela-Santos, E., Ochoa-Martinez, A., Tabilo-Munizaga, G., Reyes, J. E., Pérez-Won, M., Briones-Labarca, V., & Morales-Castro, J. (2012). Effect of high hydrostatic pressure (HHP) processing on physicochemical properties, bioactive compounds and shelf-life of pomegranate juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 13, 13–22, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.10.009>.
- Villarreal-Lozoya, J. E., Lombardini, L., & Cisneros-Zevallos, L. (2007). Phytochemical constituents and antioxidant capacity of different pecan [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] cultivars. *Food Chemistry*, 102(4), 1241–1249, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.024>

- Walker, G., & Stewart, G. (2016). *Saccharomyces cerevisiae* in the Production of Fermented Beverages. *Beverages*, 2, 1–12, <https://doi.org/10.3390/beverages2040030>.
- Wang, Z., & Goonewardene, L. A. (2004). The use of MIXED models in the analysis of animal experiments with repeated measures data. *Canadian Journal of Animal Science*, 84, 1–11, <https://doi.org/10.4141/A03-123>.
- Xu, X., Deng, J., Luo, D., Bao, Y., Liao, X., Gao, H., & Wu, J. (2018). Comparative study of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of clear and cloudy Se-enriched kiwifruit juices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.010>.
- Yáñez-López, L., Domínguez, J., Fajardo, M. C., Malpica, F., Soriano, J., Pelayo, C., ... Diaz-De-león, F. (2005). Quality attributes of different types of cactus pitaya fruits (*Stenocereus griseus*). *Acta Horticulturae*, 682, 645–650, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.83>.
- Zou, H., Lin, T., Bi, X., Zhao, L., Wang, Y., & Liao, X. (2016). Comparison of High Hydrostatic Pressure, High-Pressure Carbon Dioxide and High-Temperature Short-Time Processing on Quality of Mulberry Juice. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 217–231, <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1606-9>.

6. SINERGISMO OZONO-ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE JUGO DE PITAYA (*Stenocereus pruinosus*) ALMACENADO

6.1. Resumen

Se evaluó el efecto sinérgico ozono-APH sobre la población microbiana, parámetros de color, betalaínas, compuestos fenólicos, actividad antioxidante y preferencia sensorial en jugo de pitaya almacenado (5 ± 2 °C). Jugo de pitaya fue tratado con ozono ($24 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) durante 1.8-9.6 min, y presión de 179-321 MPa (5 min) de acuerdo con la metodología de superficie de respuesta; se empleó también un diseño de medidas repetidas con una prueba Tukey. *S. cerevisiae* se redujo $6.89 \log_{10}$ con la aplicación de 300 MPa; mientras que *L. innocua* se redujo al menos $5.1 \log_{10}$ con la aplicación de 7 min de ozono más 316 MPa (7O₃+316MPa). La microbiota nativa se mantuvo en niveles no detectables durante 30 d de almacenamiento. Sin embargo, la aplicación de 7O₃+316MPa causó la disminución de luminosidad (12.8 %), índice de saturación (5.9 %), betalaínas (33 %), fenoles totales (8 %) y actividad antioxidante (21-28 %). Pero estos jugos, después de 30 d de almacenamiento mostraron una mayor preferencia sensorial que los jugos sin tratar. La aplicación de la sinergia ozono-APH permitió la disminución de los niveles de presión y ozonizado para la obtención de jugos inocuos.

Palabras clave: Inocuidad, refrigeración, daño letal, compuestos bioactivos.

6.2. Introducción

Los jugos de frutas han sido sujeto de interés debido a sus propiedades nutricionales (Tiwari *et al.*, 2009). Por tal razón, su consumo es considerado como una de las principales estrategias para lograr un estilo de vida saludable (Jaramillo-Sánchez, Garcia-Loredo, Gómez, & Alzamora, 2018). La pitaya (*Stenoceresus* spp.), fruta valorada (por su elevado contenido betalaínas y compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes) (García-Cruz, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & Joaquín-Cruz, 2013; García-Cruz, Valle-Guadarrama, Salinas-Moreno, & Luna-Morales, 2016; Pérez-Loredo *et al.*, 2016). Algunos estudios han reportado que la ingesta de betalaínas causa efectos antiinflamatorios y anticancerígenos (vg. ovario, cervical y de vejiga) (Azeredo, 2009); por su parte los compuestos fenólicos exhiben propiedades antialérgicas, antiarterogénicas, antiinflamatorias, antimicrobianas, antitrombóticas, y muestran efectos cardioprotectores y vasodilatadores (Balasundram, Sundram, & Samman, 2006). Por lo tanto, estos frutos tienen potencial agroindustrial (García-Suárez, Carreto-Montoya, Cárdenas-Navarro, Díaz-Pérez, & López-Gómez, 2007). Sin embargo, los frutos de pitaya son altamente perecederos (aproximadamente 5 d a temperatura ambiente) (Armella, Soriano, & Ramírez, 2003). La aplicación de tratamientos térmicos en los jugos de frutas es una tecnología ampliamente adoptada para la prolongación de la vida de anaquel. Los tratamientos térmicos provocan cambios indeseables en los alimentos y modifican el balance entre alta calidad (color, sabor y funcionalidad) e inocuidad. Por lo tanto, los procesadores de alimentos han orientado su interés hacia las tecnologías no térmicas, debido a que el consumidor demanda alimentos frescos, nutritivos, inocuos y libres de químicos (Jaramillo-Sánchez, Garcia-Loredo *et al.*, 2018; Ludikhuyze & Hendrich, 2001). Una tecnología, no térmica, ampliamente estudiada es la alta presión hidrostática (APH), que ha mostrado la capacidad de preservar sabor, olor y color en los productos tratados, ésta se basa en el hecho de que las APH no afectan los enlaces covalentes de proteínas, carbohidratos, vitaminas, lípidos y pigmentos sometidos a la APH (Mozhaev, Heremans, Frank, Masson, & Balny, 1994). Asimismo, esta tecnología

permite obtener alimentos inocuos, dado que causa daño estructural, ruptura de la cadena de ADN y de la membrana celular de los microorganismos (enteropatógenos, hongos y levaduras); además, las funciones celulares de estos se alteran cuando se desactivan enzimas clave o la membrana pierde su selectividad (Lado y Yousef, 2002). No obstante, trabajos previos mostraron que la efectividad antimicrobiana de las APH en jugo de pitaya está sujeta al uso de elevados niveles de presión por periodos prolongados de tiempo (550-600 MPa, 12-16 min) (Quiroz-González, Rodríguez-Martínez, García-Mateos, Torres, & Welti-Chanes, 2018).

Otra alternativa de procesamiento no térmico para favorecer la vida de anaquel, en algunos jugos, ha sido la aplicación de ozono. El ozono es un fuerte oxidante efectivo para el control de bacterias, mohos, protozoarios y virus (Rodoni *et al.*, 2010); la descomposición del ozono produce radicales libres, principalmente hidroxilo, y sus efectos están asociados con la inactivación de enzimas, la alteración de ácidos nucleicos y la peroxidación lipídica a nivel de las membranas microbianas. Se ha evaluado su efecto en jugos de naranja, manzana y durazno para el control del crecimiento bacteriano (Garcia *et al.*, 2015; Patil *et al.*, 2009; Torlak, 2014). Si bien, algunas publicaciones han confirmado el efecto positivo del ozono sobre la calidad microbiana de los jugos, también el impacto de este fuerte antioxidante sobre compuestos bioactivos debería ser investigado. Al respecto, se han observado reducciones en el contenido de antocianinas (hasta 98.2 %) y ácido ascórbico (hasta 85.8 %) cuando se aplican 10.6 – 70.8 mg O₃ L⁻¹ durante 10 min en jugo de fresa (Tiwari, O'donnell *et al.*, 2009); asimismo, se ha observado una afectación negativa en el color, parámetros reológicos y contenido de compuestos fenólicos en jugo de manzana tratado con 10 - 48 mg O₃ L⁻¹ durante 10 min (Torres *et al.*, 2011). Por su parte, Garcia, Guerrero, & Alzamora (2015) evaluaron un jugo de durazno tratado con 22 - 40 mg O₃ L⁻¹ de jugo durante 12 min y lograron inactivar 1, 4.3 y 4.9 ciclos logarítmicos la población de *Saccharomyces cerevisiae*, coliformes y *Listeria innocua*, respectivamente; no obstante, se observó una reactivación de estos microorganismos durante el almacenamiento (14 d). Lo anterior muestra que las

elevadas concentraciones de ozono pueden afectar negativamente la calidad de los jugos tratados; en contraste, las bajas concentraciones ponen en riesgo la inocuidad de los jugos.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar un posible efecto sinérgico de una relativa baja dosis de ozono (24 mgL^{-1} de jugo min^{-1}) en combinación con niveles relativamente bajos de APH (179 – 321 MPa, 5 min) sobre la inocuidad, el color, propiedades fitoquímicas y preferencia sensorial del jugo de pitaya.

6.3. Materiales y métodos

6.3.1. Material vegetal

Frutos de pitaya (en madurez hortícola, 75 % de tonalidad roja en el pericarpio) se recolectaron en una plantación comercial de Santa Clara Huiziltepec, Pue., México (Latitud: $18^{\circ}46' \text{ N}$; Longitud: $97^{\circ}53' \text{ O}$). Después de la cosecha, las pitayas fueron enfriadas (para eliminar el calor de campo) hasta obtener una temperatura interna del fruto de $10 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (3 frutos muestreados con la interfaz de recopilación de datos Vernier LabPro®, USA). Para la extracción del jugo se removieron manualmente las espinas de los frutos, estos se lavaron, se desinfectaron con hipoclorito de sodio (216 mg L^{-1}) y se les eliminó el pericarpio. Después la pulpa se colocó en un extractor de jugos (TURMIX™, México), donde se separaron las semillas del jugo. Finalmente, el jugo ($\text{pH}: 5.13 \pm 0.06$, $\text{SST}: 12.23 \pm 0.06^{\circ} \text{ Bx}$ y ácido málico: $0.02 \pm 0.00 \%$, peso fresco) se colectó y se almacenó en congelación ($-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta el momento de la aplicación de los tratamientos.

6.3.2. Reactivos

Los reactivos químicos empleados fueron: Agar para métodos estándar (AME), Agar dextrosa y papa (ADP), agar de soya tripticaseína (AST), caldo de soya tripticaseína (CST) y extracto de levadura (EL), de la marca BD Bioxon; peptona buferada, ácido tartárico y extracto de malta (EM), de la marca Fluka Analytical, Meyer y Difco, respectivamente; metanol, glucosa, ácido gálico (AG), reactivo de Folin-Ciocalteu, DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) y trolox ((\pm)-6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid), de la marca Sigma-Aldrich; y

carbonato de sodio e hidróxido, de sodio de la marca J.T. Baker. Se empleó agua destilada para la preparación de los medios de cultivo y de los reactivos para los análisis fitoquímicos y antioxidantes.

6.3.3. Material biológico

Para evaluar el efecto biocida de los tratamientos se emplearon cepas de *L. innocua* ATCC 33090 y *S. cerevisiae* CDBB-L-331 obtenidas de la Colección Nacional de Cepas Microbianas y Cultivos Celulares del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (San Pedro Zacatenco, Ciudad de México, México). *L. innocua* se empleó debido a la patogenicidad, ya que de 20-30 % de las infecciones por listeriosis pueden ser fatales (Ramaswamy *et al.*, 2007), también se empleó debido a que en trabajos previos se ha observado que esta cepa presenta barorresistencia (Quiroz-González *et al.*, 2018). Por otro lado, *S. cerevisiae* se empleó como indicador de vida de anaquel de los jugos, por su importancia en la fermentación del jugo de pitaya.

Curva de crecimiento

Para la activación de la cepa, una asada de *L. innocua* se inoculó en CST con 0.6 % (p/v) de EL se incubó a 37 °C por 16 h (en estufa de cultivo, Riossa™, México). Posteriormente, una alícuota (1 mL) se transfirió a CST-EL e incubó bajo las mismas condiciones, y se realizaron muestreos cada 6 h por 30 h. Para el caso de *S. cerevisiae*, se usó un medio CLM (0.3 % de EL, 0.3 % de EM, 0.5 % de peptona y 1 % de glucosa; ajustado a pH 3.5 con ácido tartárico a 10 %), la temperatura de incubación fue de 27 °C (durante 16 h para la activación de la cepa) y el muestreo para la obtención de la curva de crecimiento se realizó cada 8 h por 30 h. El tiempo para alcanzar la fase exponencial fue de 15 y 20 h para *L. innocua* y *S. cerevisiae*, respectivamente, mientras la fase estacionaria temprana se alcanzó a las 17 y 24 h, respectivamente (Apéndice 6.2, Figura 14).

Cultivo stock

Un alícuota (1 mL) de *L. innocua* activada se inoculó en CST-EL (100 mL) e incubó bajo las condiciones descritas previamente hasta alcanzar la fase

exponencial (Bruschi, Komora, Castro, Saraiva, Ferreira, & Teixeira, 2017). Para la obtención de un pellet de células, 50 mL de *L. innocua* en fase exponencial se centrifugaron a 2900 g (centrífuga Thermo Scientific, Sorvall ST 8, China) por 5 min. Después, el pellet fue lavado dos veces con agua peptonada bufferada (0.1 % p/v) y resuspendido en una solución de peptona-glicerol (relación 4:1) para obtener el cultivo stock. El cultivo stock se colocó en tubos de centrifuga (1 mL) de polipropileno y se almacenó a -20 °C y usados durante 15 d. El cultivo stock de *S. cerevisiae* se preparó de manera similar, con el uso de su medio de cultivo correspondiente e incubación a 27 °C.

Inóculo

1 mL del cultivo stock de *L. innocua* (descongelado) se agregó a 100 mL de un medio CST-EL e incubado at 37 °C hasta alcanzar la fase estacionaria temprana. Siguiendo la metodología previamente descrita, se recuperaron las células mediante centrifugación, lavadas dos veces con agua peptonada bufferada, y resuspendidas en agua peptonada bufferada (3 mL). De manera similar, 1 mL del cultivo stock de *S. cerevisiae* (descongelado) se agregó a 100 mL de un medio CLM e incubó 27 °C hasta alcanzar la fase estacionaria temprana. Después del lavado y resuspensión de las células en 3 mL de agua peptonada bufferada, se obtuvo una concentración de alrededor de 8.5 log₁₀ (UFC mL⁻¹) de ambos microorganismos.

Inoculación del jugo

1 mL del inóculo se transfirió a 150 mL de jugo estéril (a 121 °C for 15 min) para obtener una concentración inicial de 6.9±0.34 y 7.5±0.24 log₁₀ (UFC mL⁻¹) de la población de *S. cerevisiae* y *L. innocua*, respectivamente. Para favorecer la adaptación de los microorganismos inoculados, el jugo inoculado se almacenó durante 3 h a 21 ± 1 °C antes de aplicar los tratamientos.

6.3.4. Experimento 1. Efecto del ozono y alta presión hidrostática sobre *L. innocua* y *S. cerevisiae*

Se evaluó el efecto del tiempo de ozonizado (24 mg O₃ L⁻¹ de jugo min⁻¹ durante 1.8, 3, 5.75, 8.5 y 9.6 min) y del nivel de presión (179, 200, 250, 300 y 321 MPa

por 5 min) en el jugo de pitaya. El jugo (125 mL) inoculado con las cepas indicadas (de manera separada) se trató con ozono (Biozon K-20, México); para la aplicación de las APH, un volumen menor de jugo (10 mL) se envasó al vacío (en equipo Henkelman, the Netherlands) en bolsas de polietileno (Oster™) y posteriormente se aplicó la APH (en equipo Elmhurst Systems, LLC; usando agua como medio de presurización). La temperatura en la cámara de presurización osciló entre 23.2 - 25.0 °C.

Evaluación microbiana

Se realizaron diluciones decimales de jugo inoculado tratado y sin tratar (control) en agua peptonada bufferada 0.1 % (p/v). *L. innocua* se sembró en placas con Agar soya tripticaseína con 0.6 % de extracto de levadura (p/v) e incubó a 37 °C por 48 h (Bruschi *et al.*, 2017). La cuenta de *S. cerevisiae* se realizó en un medio PDA (pH 3.5) y la incubación se realizó a 27 °C por 5 d (Leyva-Daniel *et al.*, 2017). Los valores se expresaron como $\log_{10}(N/N_0)$ (N : cuenta después de tratamiento, N_0 : cuenta inicial) y se reportó el valor promedio de tres repeticiones (cada repetición se evaluó por duplicado).

6.3.5. Experimento 2. Efecto de la combinación ozono-APH

El jugo (125 mL) inoculado con las cepas indicadas (de manera separada) fue tratado con ozono (Biozon K-20, México; 24 mg O₃ L⁻¹ min⁻¹), posteriormente, se tomó una muestra (10 mL) de este jugo, el cual se envasó al vacío en bolsas de polietileno, y finalmente éstas se presurizaron (23.2 - 25.0°C); la descripción de los tratamientos se muestra en el Cuadro 18. La evaluación de *L. innocua* y *S. cerevisiae* se realizó siguiendo el método descrito previamente.

Cuadro 18. Diseño compuesto central (superficie de respuesta) con las condiciones de procesamiento del jugo de pitaya (presión y tiempo de ozonizado) y los datos codificados.

Condiciones de procesamiento		Datos codificados	
Presión (MPa) ^z	Tiempo de ozonizado (min) ^y	Presión	Tiempo de ozonizado
179	5.75	-1.414	0
200	3	-1	-1
200	8.5	-1	1
250	1.8	0	-1.414
250	5.75	0 ^x	0 ^x
250	9.6	0	1.414
300	3	1	-1
300	8.5	1	1
321	5.75	1.414	0

^zTiempo de procesamiento: 5 min.

^yFlujo de ozono: 24 mg L⁻¹ min⁻¹

^xEn el punto central (0) del diseño se realizaron 5 repeticiones.

6.3.6. Experimento 3. Validación del daño letal de *L. innocua* y *S. cerevisiae*

Muestras de jugo previamente inoculado con *L. innocua* y *S. cerevisiae* (de manera separada) fueron tratadas con la combinación O₃-APH óptima (reducción de más de 5 ciclos logarítmicos de la población de ambos microorganismos) y luego almacenadas por 15 d (5 ± 2 °C), la evaluación microbiológica se realizó cada 5 d.

6.3.7. Experimento 4. Vida de anaquel del jugo tratado con la combinación O₃-APH

Después de la evaluación de la efectividad del tratamiento seleccionado, muestras de jugo sin esterilizar y sin inocular fueron tratadas (O₃-APH óptima) y almacenadas por 35 d (5 ± 2 °C).

Microbiota nativa

Se realizaron diluciones decimales de jugo tratado y sin tratar (control) en agua peptonada bufferada 0.1 % (p/v). Las diluciones de mesófilos aerobios se sembraron en placas con AME e incubaron a 37 °C por 48 h. Los hongos y levaduras (HyL) se sembraron en placas con ADP (pH 3.5) e incubaron a 27 °C

por 5 d (Leyva-Daniel *et al.*, 2017). Los valores se expresaron como \log_{10} UFC mL⁻¹ y se reportó el valor promedio de tres repeticiones (cada repetición se evaluó por duplicado).

Parámetros de color

Con la metodología propuesta por McGuire (1992) se evaluó el cambio neto de color (ΔE , Ec. 1), luminosidad (L), ángulo de tono (Ec. 2) e índice de saturación de color (Ec. 3) con los valores de *L*, *a* y *b* obtenidos con un colorímetro Hunter Lab (MiniScan™ XE Plus No. 45/O-L (EUA), series 5348).

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Ángulo de tono} = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Índice de saturación} = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

Propiedades fitoquímicas y antioxidantes

Preparación de extractos

Muestra (2 mL) de jugo se diluyó en 8 mL de metanol (99.8 %), posteriormente esta dilución se sonicó con un equipo de ultrasonido (Cole Parmer 8890, Illinois, USA) por 5 min y se centrifugó (centrífuga Sol-bat J-600, México) a 4000 g (5560 rpm) por 5 min. El extracto metanólico obtenido se empleó para la evaluación de fenoles totales, betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas) y actividad antioxidante.

Contenido de betalaínas

Para la evaluación de betalaínas se siguió el método empleado por (Pérez-Loredo *et al.*, 2016) adaptado a microplaca de 96 pozos. El extracto metanólico se diluyó en una relación 1:9 en agua destilada; de esta dilución se tomaron 300 μ L y se depositaron en una microplaca; posteriormente, se realizó la lectura en un lector de microplacas (BioTek™, Sinergy 2, USA) a las longitudes de onda de 535 y 483 nm para betacianinas y betaxantinas, respectivamente. La

concentración de betacianinas y betaxantinas se determinó con la ecuación descrita por García-Cruz *et al.* (2016):

$$\text{Betacianinas ó betaxantinas (mg mL}^{-1}\text{)} = \frac{(1000 \times A \times \text{FD} \times \text{PM} \times V)}{(\epsilon \times P \times L)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Donde: A= Absorbancia para cada pigmento, FD= Factor de dilución, PM= peso molecular (betacianina y betaxantina, 550 y 308 g mol⁻¹, respectivamente), V= volumen del extracto, ϵ : coeficiente de extinción molar (betacianina y betaxantina, 60 000 y 48 000 L mol cm⁻¹, respectivamente), P= peso del jugo y L= longitud de la celda.

Contenido de fenoles totales

Esta determinación se realizó con base en el método propuesto por Sánchez-Rangel *et al.* (2013). 240 μL de agua, 15 μL del extracto y 15 μL de Folin (0.25 N) se colocaron en una microplaca y la mezcla se reposó durante 3 min en oscuridad; posteriormente, se adicionaron 30 μL de Na_2CO_3 (1N) y se llevó a cabo la reacción en oscuridad por 30 min. Finalmente, se realizó la lectura de la absorbancia a 765 nm. La concentración de los fenoles totales se determinó mediante una curva de ácido gálico con concentraciones de 0.01 to 0.09 mg mL⁻¹ ($y = 0.2781x + 0.0096$, $R^2 = 0.9979$). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico mL⁻¹.

Evaluación de actividad antioxidante (AA)

La evaluación de AA se realizó por el método del radical libre DPPH siguiendo el método de Villarreal-Lozoya *et al.* (2007) con modificaciones. En una microplaca se llevó a cabo la reacción entre 50 μL de una solución 1mM de DPPH y 200 μL del extracto (5 %) a una longitud de onda de 515 nm por 30 min. Para la determinación de la AA se elaboró una curva estándar de trolox con concentraciones de 0.002 – 0.16 μM ($y = -0.3385x + 0.1761$, $R^2 = 0.9969$).

La evaluación de AA mediante la oxidación del radical catión ABTS se realizó siguiendo el método descrito por Re *et al.* (1999) con modificaciones. Para la

preparación de la disolución del radical ABTS, 10 mL de ABTS 7.4 mM se mezcló con 10 mL de una solución de persulfato de sodio 2.6 mM. La mezcla reposó a temperatura ambiente y en oscuridad durante 16 h. Después, 1 mL de la disolución del radical ABTS se disolvió en metanol puro hasta obtener una absorbancia de 0.73 (a 734 nm). En una microplaca se llevó a cabo la reacción entre 20 μ L del extracto metanólico (50 %) y 180 μ L de disolución de ABTS, la disminución de la absorbancia se registró a 734 nm después de 10 min. La AA se cuantificó a través de una curva estándar de trolox con concentraciones de 0.05 – 0.4 μ mol ($y = -0.6821x + 0.4506$, $R^2 = 0.9935$). Los resultados se expresaron en μ M equivalentes de Trolox mL^{-1} .

La evaluación de las propiedades fitoquímicas y antioxidantes se realizó por triplicado (cada repetición se ejecutó por duplicado).

Evaluación sensorial

Se aplicó una prueba de 2-Selección Alternativa Forzada a 56 panelistas no entrenados (con edades entre 15 y 34 años) consumidores de pitaya. Cada panelista recibió dos pares de muestras codificadas; cada par contenía un jugo control (sin tratamiento y sin almacenamiento) y un jugo tratado (con 316 MPa/7 min O_3 y almacenado por 30 d a $5 \pm 2^\circ \text{C}$). Se solicitó que probaran la muestra (10 mL) una sola vez y que de cada par presentado eligieran la muestra de su preferencia; se indicó a los panelistas que en caso de que no tuvieran preferencia por alguna muestra deberían elegir al azar (Hernández-Montes, 2007).

6.3.8. Análisis estadístico

El efecto biocida del ozono y la APH sobre la población de *S. cerevisiae* y *L. innocua* se analizó con el programa Statistical Analysis System version 9, para Windows (SAS Institute Inc., Cary, NC), por medio de un ANOVA y prueba Tukey ($p= 0.05$). Los resultados se presentaron como la media \pm desviación estándar ($n= 3$ repeticiones).

El efecto sinérgico ozono-APH se evaluó mediante un diseño experimental compuesto central con dos factores (presión: 179 – 321 MPa; tiempo de

ozonizado: 1.8 –9.6 min), 5 niveles y 5 puntos centrales (Cuadro 18) usando Minitab® 17.1.0 (Minitab Inc., State College, PA) y los resultados se analizaron mediante la metodología de superficie de respuesta para la obtención de la siguiente ecuación polinomial de segundo grado (Ec. 5):

$$Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_1x_2 + B_4x_1^2 + B_5x_2^2 \quad (\text{Ec. 5})$$

donde: B_0 : constante, B_1 y B_2 : coeficientes lineales, B_3 : coeficiente de product cruzado, B_4 y B_5 : coeficientes cuadráticos, x_1 y x_2 = variables independientes (presión y tiempo de ozonizado), y $Y = \log_{10}(N/N_0)$. Se obtuvo un modelo simplificado usando $p = 0.05$ para discriminar los términos no significativos. De acuerdo con el modelo simplificado se obtuvo el tratamiento que predijo la reducción de más de 5 ciclos logarítmicos la población de *L. innocua*.

Los datos de la recuperación de *L. innocua* y *S. cerevisiae* fueron analizados con un modelo mixto para medidas repetidas (Ec. 6), con una prueba Tukey (software Statistical Analysis System version 9, para Windows).

$$y_{ijt} = \mu + \alpha_i + d_{j(i)} + \gamma_t + (\alpha\gamma)_{it} + e_{ijt} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde: Y_{ijt} = respuesta medida en el tiempo t en la j -ésima repetición asignada al i -ésimo tratamiento, $Y_{ijt} \sim \text{NI}(0, \sigma_y^2)$ (con distribución normal independiente, con media 0 y varianza constante), μ = efecto de la media general, α_i = efecto fijo del i -ésimo tratamiento, $d_{j(i)}$ = efecto aleatorio de la j -ésima repetición dentro del-ésimo tratamiento, $d_{j(i)} \sim \text{NI}(0, \sigma_d^2)$, γ_t = efecto fijo del t tiempo cuando se realizó la medición, $(\alpha\gamma)_{it}$ = efecto fijo de la interacción entre el tratamiento y el tiempo, e_{ijt} = error aleatorio asociado con la j -ésima repetición asignada al i -ésimo tratamiento en el tiempo t , $e_{ijt} \sim \text{NID}(0, \sigma_e^2)$. Bajo el supuesto que $d_{j(i)}$ y e_{ijt} son independientes (Wang & Goonewardene, 2004).

Se realizó un análisis del coeficiente de correlación de Pearson entre los compuestos bioactivos y la AA, el cual está definido por la Ec.7.

$$r_{jk} = \frac{\sum_i (X_{ij} - \bar{X}_j)(X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_i (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \sqrt{\sum_i (X_{ik} - \bar{X}_k)^2}}, \text{ con } i = 1, \dots, p \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde X_{ij} es el valor de la variable i para el caso j , y \bar{X}_j es la media de todas las variables que definen el caso j (Díaz & Morales, 2012).

Para la evaluación de las diferencias en la preferencia de los jugos se usó una distribución chi-cuadrada (χ^2) (Ec.8).

$$\chi^2 = \frac{[(O_C - E_C) - 0.5]^2}{E_C} + \frac{[(O_T - E_T) - 0.5]^2}{E_T} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde O_C = número de elecciones observadas para la muestra control; O_T = número de opciones observadas para las muestras tratadas; E_C = número de elecciones esperadas para la muestra control ($N/2 = 56$); E_T = número de elecciones esperadas para la muestra tratada ($N/2 = 56$, again) (Lawless & Heymann, 2010).

6.4. Resultados y discusión

6.4.1. Efecto del ozono o alta presión hidrostática sobre *L. innocua* y *S. cerevisiae*

S. cerevisiae fue más susceptible al efecto de la presión que *L. innocua*, ya que *S. cerevisiae* fue inhibida totalmente a partir de la aplicación de 300 MPa; mientras que *L. innocua* sólo se redujo 12 % cuando fue sometida a la misma presión (Cuadro 21). Estos resultados coinciden con lo ya establecido por Trujillo (2002) en el sentido de que los hongos y levaduras son más sensibles a la APH que las bacterias. Los resultados también concuerdan por lo declarado por Lado & Yousef (2002), quienes han mencionado que los microorganismos de tamaño pequeño (vg. bacterias) son más resistentes a la APH que los grandes (vg. hongos y levaduras), debido a que la reducida área de la superficie celular en contacto con el medio ambiente puede limitar la fuga de células a una intensidad de presión dada, y así minimizar el efecto del tratamiento.

En contraste, en el presente trabajo también se encontró que *L. innocua* fue más sensible a la aplicación de ozono que *S. cerevisiae*; tal como ya ha sido reportado para jugo de durazno tratado con 22-40 mg O₃ L⁻¹ min⁻¹ por 2 min (García, Guerrero, & Alzamora, 2015).

Entonces, los resultados de esta fase experimental sugieren que para lograr una reducción superior a 5 ciclos logarítmicos (FDA, 2001) de ambos microorganismos (*S. cerevisiae* y *L. innocua*) se requeriría tanto de niveles de presión como de tiempos de exposición al ozono elevados. Otra alternativa sería la aplicación de las dos tecnologías no térmicas de manera combinada (O₃-APH) para evaluar un posible efecto sinérgico; esto justificó el desarrollo del siguiente experimento.

Cuadro 19. Reducción de *L. innocua* y *S. cerevisiae* (Log UFC mL⁻¹) en jugo de pitaya tratado con ozono o APH (media ± desviación estándar).

Presión (MPa) ^z	<i>L. innocua</i>	<i>S. cerevisiae</i>	Tiempo de ozonizado (min) ^y	<i>L. innocua</i> ^x	<i>S. cerevisiae</i> ^w
179	-0.18 ± 0.07 a ^u	-0.78 ± 0.40 a	1.8	-0.15 ± 0.04 a	-0.07 ± 0.03 a
200	-0.19 ± 0.07 a	-0.60 ± 0.13 a	3	-0.06 ± 0.06 a	-0.21 ± 0.04 b
250	-0.19 ± 0.04 a	-1.46 ± 0.02 b	5.75	-0.67 ± 0.00 b	-0.40 ± 0.00 c
300	-0.89 ± 0.12 b	Nd ^v	8.5	-1.80 ± 0.17 c	-0.45 ± 0.03 c
321	-1.34 ± 0.10 c	Nd	9.6	-2.51 ± 0.03 d	-0.47 ± 0.04 c

^zTiempo de procesamiento: 5 min

^yFlujo de ozono: 24 mg L⁻¹ min⁻¹

^xPoblación inicial de *L. innocua*: 7.5 ± 0.24 log UFC mL⁻¹

^wPoblación inicial de *S. cerevisiae*: 6.89 ± 0.34 log₁₀ UFC mL⁻¹

^vNo detectado.

^uMedias con letras diferentes, en cada columna, indican diferencias significativas (prueba Tukey, p < 0.05).

6.4.2. Efecto de la combinación ozono-APH

El efecto sinérgico O₃-APH para reducir la población de *S. cerevisiae* en los jugos no fue necesario, ya que sólo con la aplicación de 300 MPa (5 min) fue suficiente para lograr la reducción de esta levadura hasta niveles no detectables; estos resultados son similares a los obtenidos con la aplicación de al menos 300 MPa con un ozonizado previo de 3, 5.75 u 8.5 min (Figura 9).

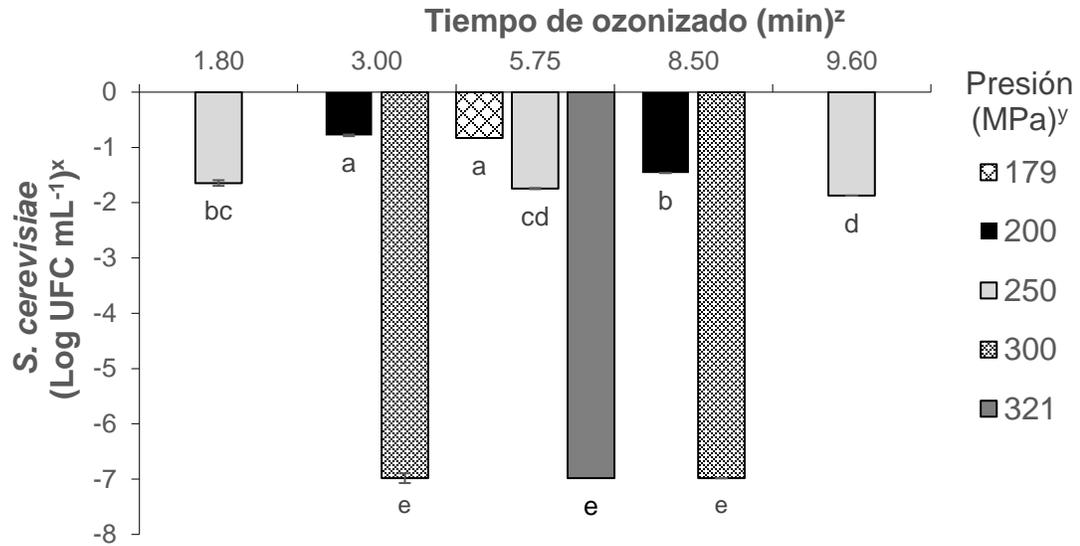


Figura 9. Efecto sinérgico de O₃-APH sobre la inactivación de *S. cerevisiae* en jugo de pitaya (media \pm desviación estándar, n = 3). ²Flujo de ozono: 24 mg L⁻¹ min⁻¹. ^yTiempo de procesamiento de cada presión: 5 min. ^xPoblación inicial: 6.98 \pm 0.34 log₁₀ UFC mL⁻¹. Barras verticales indican la desviación estándar. Medias con letras diferentes, indican diferencias significativas (prueba Tukey, p < 0.05).

En contraste, como se mencionó previamente, se detectó que *L. innocua* fue muy resistente a la APH, debido a que se encontró una reducción máxima de 1.34 log₁₀ UFC mL⁻¹ con la aplicación de 321 MPa (5 min). Esta elevada baroresistencia fue detectada en un trabajo previo, en el que se redujo 5 log₁₀ UFC mL⁻¹ la población de *L. innocua* hasta que se aplicaron niveles elevados de presión (600 MPa, 12 min) en el jugo de pitaya (Quiroz-González, Rodríguez-Martínez, García-Mateos, Torres, & Welti-Chanes, 2018). Sin embargo, en el presente trabajo se encontró evidencia de que la reducción de *L. innocua* se logra con la aplicación de menores niveles de presión si se combina con un ozonizado previo del jugo, debido al efecto sinérgico encontrado como lo demuestra la Cuadro 20.

Cuadro 20. Efecto sinérgico de O₃-APH sobre la inactivación de *L. innocua* en jugo de pitaya.

Presión (MPa) ^z	Tiempo de ozonizado (min) ^y	<i>log</i> ₁₀ (media ± desviación estándar)
179	5.75	-1.95 ± 0.01
200	3	-0.37 ± 0.02
200	8.5	-3.68 ± 0.06
250	1.8	-1.09 ± 0.07
250	5.75	-1.03 ± 0.02
250	5.75	-0.75 ± 0.03
250	5.75	-0.70 ± 0.00
250	5.75	-0.60 ± 0.00
250	5.75	-0.73 ± 0.01
250	9.6	-4.71 ± 0.05
300	3	-3.66 ± 0.00
300	8.5	-6.20 ± 0.00
321	5.75	-3.57 ± 0.23

^zTiempo de procesamiento para cada presión: 5 min.

^yFlujo de ozono: 24 mg L⁻¹ min⁻¹.

El modelo predictivo ($R^2_{adj} = 92.75\%$, Ec. 9) indicó que la aplicación de 7 min de ozono más la aplicación de 316 MPa durante 5 min (7O₃+ 316MPa) fue suficiente para inactivar 5.1 log₁₀ UFC mL⁻¹ (Figura 10).

$$-27.91 + 0.2182 P + 1.373 t - 0.000479 P^2 - 0.1635 t^2 \quad (\text{Ec. 9})$$

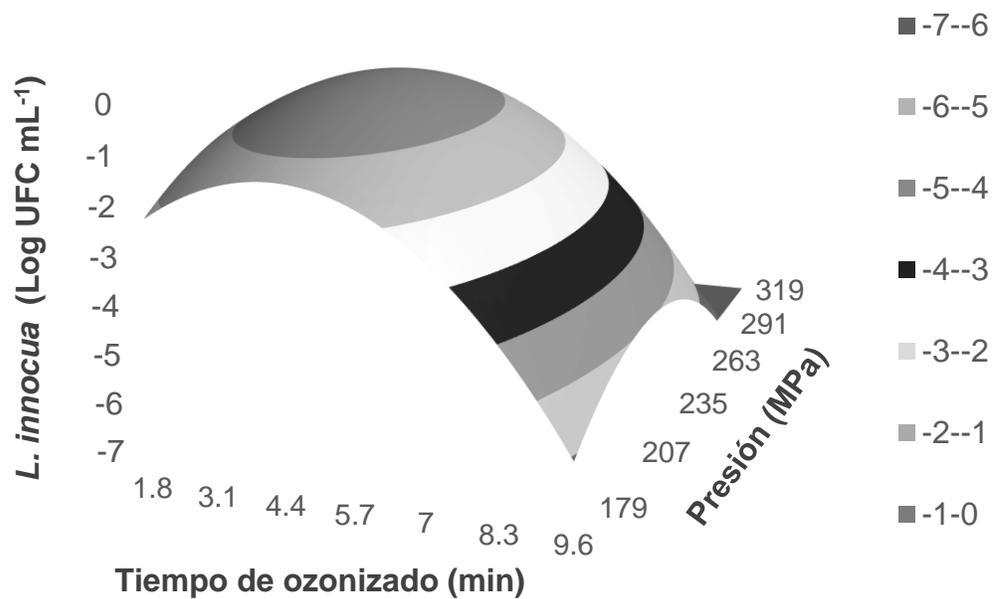


Figura 10. Superficie de respuesta de la reducción de *L. innocua* en jugo de pitaya tratado con ozono ($24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$) y alta presión hidrostática (5 min).

El efecto biocida de la sinergia O_3 -APH encontrado pudo haber ocurrido debido a que el ozono pudo provocar daño superficial a la membrana celular, debido a la afinidad de éste para reaccionar con las proteínas de la misma (Thanomsub, Anupunpisit, Chanphetch, & Watcharachaipong, 2002) con el consecuente daño a los fosfolípidos que la conforman, ya que la exposición a las APH, además de modificar la estructura cuaternaria de las proteínas, provocan el cambio de fase (gel-sólido) de los lípidos (Cheftel, 1995), lo que finalmente de alguna manera pudo causar la inactivación de *L. innocua*.

Aunque no hubo necesidad de un efecto sinérgico O_3 -APH para la reducción de *S. cerevisiae*, se procedió a validar el daño letal provocado por el tratamiento $7\text{O}_3+316 \text{ MPa}$ tanto de *S. cerevisiae* como de *L. innocua*, esto debido a que el daño a las células microbianas (bacterias o levaduras) podría ser reversible durante el almacenamiento (Bozoglu, Alpas, & Kaletunç, 2004), lo cual implicaría una reactivación posterior de estos microorganismos y consecuentemente pondría en riesgo la salud del consumidor y/o la calidad de los jugos.

6.4.3. Validación del daño letal de *L. innocua* y *S. cerevisiae*

Las poblaciones microbianas se mantuvieron elevadas durante los 15 d de almacenamiento (5 ± 1 °C) en los jugos sin tratar con una disminución mínima de 0.23 ciclos logarítmicos para el caso de la población de *S. cerevisiae*. Por el contrario, los jugos tratados con $7O_3 + 316MPa$ mostraron la reducción predicha (más de 5 ciclos logarítmicos) inmediatamente después del tratamiento, más una reducción adicional durante el almacenamiento, ya que tanto *L. innocua* como *S. cerevisiae* se redujeron hasta niveles no detectables a partir de los 10 d de almacenamiento en los jugos tratados (Figura 11). Esta disminución puede atribuirse a que los microorganismos fueron dañados a un grado que ya no fue posible su recuperación, o bien, es posible que la presencia de betalaínas en el jugo de pitaya contribuyera con su actividad antimicrobiana. Al respecto, se ha reportado que las betalaínas tienen actividad quelante de metales, y consecuentemente podrían haber quelado cationes internos como Ca^{2+} , Fe^{2+} y Mg^{2+} de los microorganismos (Hayek & Ibrahim, 2012). Este efecto antimicrobiano también ha sido reportado en extractos de xoconostle (*Opuntia matudae*) y de pitahaya (*Hylocereus polyrhizus*) (Carlo, Novellino, & Basile, 2011; Hayek & Ibrahim, 2012), frutos que al igual que la pitaya, también contienen betalaínas como pigmentos.

La evidencia mostrada anteriormente acerca de la reducción microbiana quedaría incompleta sin el análisis del efecto del tratamiento $7O_3+316MPa$ sobre el color, potencial nutracéutico y preferencia sensorial; ante tal necesidad, para completar el estudio, se planteó el siguiente experimento.

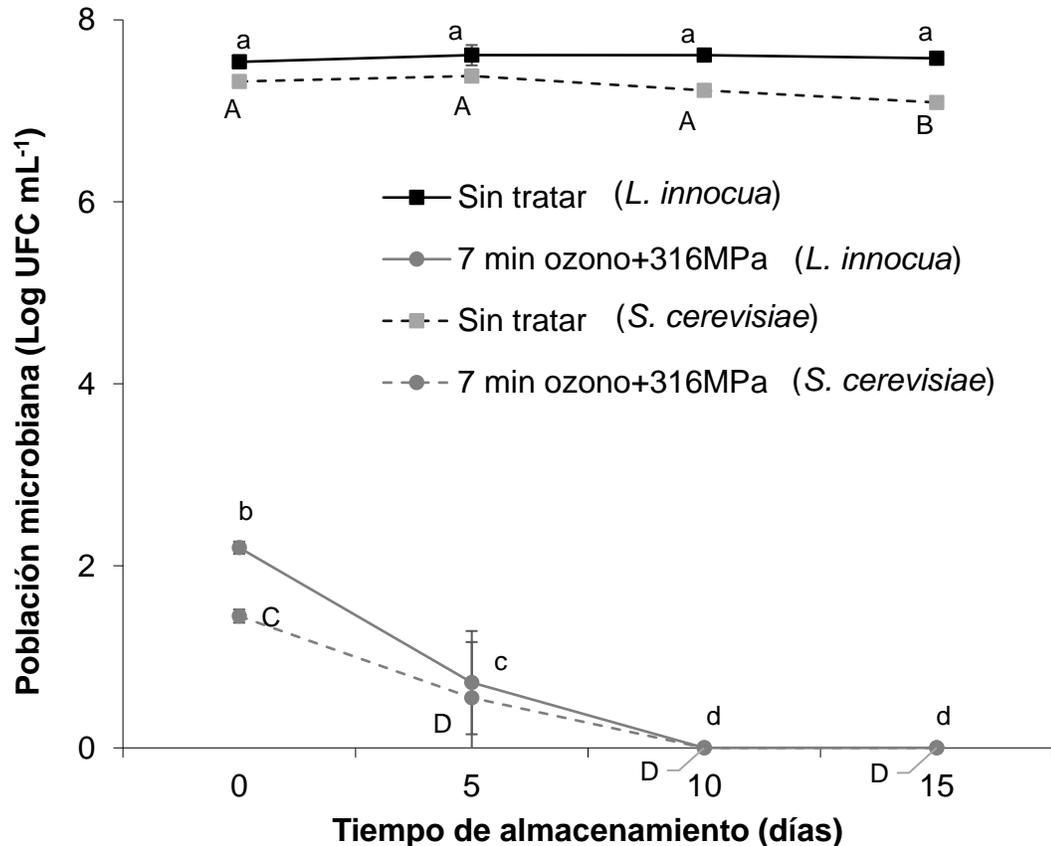


Figura 11. Comportamiento de la población microbiana de *S. cerevisiae* y *L. innocua* en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C). 7 min ozono+316 MPa: aplicación de 7 min de ozono con un flujo de $24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ más 316 MPa durante 5 min. Barras verticales indican la desviación estándar. Medias con letras minúsculas y mayúsculas diferentes indican diferencias significativas de la población de *L. innocua* y *S. cerevisiae*, respectivamente (prueba Tukey, $p < 0.05$).

6.4.4. Vida de anaquel del jugo tratado con la combinación O₃-APH

Microbiota nativa

Los jugos sin tratar mostraron un aumento de la microbiota nativa durante el almacenamiento hasta lograr un incremento máximo de 4.7 y 2.6 \log_{10} UFC mL^{-1} la población de mesófilos aerobios y HyL, respectivamente (Cuadro 21); mientras que en los jugos tratados con $7\text{O}_3+316\text{MPa}$, estos microorganismos se mantuvieron por debajo del nivel detectable por 30 d de almacenamiento; sin embargo, con un pequeño incremento (5 d) del almacenamiento observó un efecto negativo; ya que a los 35 d, la población de hongos y levaduras se incrementó abruptamente. Al parecer en la microbiota nativa del jugo

posiblemente estaba presente una cepa resistente (colonias rosadas sin identificar) a la sinergia 7O₃+316MPa; esto explicaría tanto el efecto del daño subletal como la adaptación de las levaduras al medio (Lado & Yousef, 2002). Al respecto, se ha reportado que las levaduras responden a daños subletales ya que generan un serie de respuestas adaptativas al estrés, tales como síntesis de proteínas de choque térmico (o estrés), alteraciones en la composición de la membrana lipídica y actividad de la ATPasa de la membrana plasmática, así como la modulación de los procesos de intercambio iónico (Birch & Walker, 2000).

Cuadro 21. Cambios en la microbiota nativa (log₁₀ UFC mL⁻¹) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C).

Tiempo de almacenamiento	Mesófilos aeróbios		Levaduras y hongos	
	Sin tratar	7O ₃ +316MPa ^z	Sin tratar	7O ₃ +316MPa ^a
0	1.99 ± 0.07 g ^y	Nd ^x	3.52 ± 0.01 e	Nd
5	4.06 ± 0.09 f	Nd	4.89 ± 0.06 d	Nd
10	5.36 ± 0.06 e	Nd	5.42 ± 0.02 c	Nd
15	6.24 ± 0.05 d	Nd	6.12 ± 0.03 a	Nd
25	6.73 ± 0.01 a	Nd	6.06 ± 0.03 b	Nd
30	6.67 ± 0.01 b	Nd	6.05 ± 0.05 b	Nd
35	6.59 ± 0.02 c	Nd	6.04 ± 0.05 b	3.37 ± 0.02 f

^z7O₃+316MPa= jugo ozonizado (24 mg L⁻¹ min⁻¹) por 7 min, y después presurizado a 316 MPa (5 min).

^yMedias con letras diferentes (por microorganismo) indican diferencias significativas (prueba Tukey, p < 0.05).

^xNd= No detectado.

Debido a la recuperación de una levadura resistente a los 35 d de almacenamiento y de acuerdo con la norma nacional vigente NOM-130-SSA1-1995 (Secretaría-de-Salud, 1995), que establece un límite de 25 UFC mL⁻¹ la carga de hongos y levaduras en jugos pasteurizados, las variables de color, fitoquímicas y preferencia sensorial se evaluaron sólo en jugos almacenados hasta los 30 d, porque estos jugos mostraron una carga de mesófilos aerobios y hongos y levaduras por debajo del límite mencionado, lo que evidencia su inocuidad.

Parámetros de color

Después de la aplicación del tratamiento ($7O_3+316MPa$), el cambio neto de color (ΔE) de los jugos se incrementó (1.4 unidades) significativamente; asimismo, al final del almacenamiento (30 d) los jugos tratados se mantuvieron con ΔE mayor (1.1 unidades) en comparación con los jugos sin tratar (Figura 12). El ΔE en los jugos se debió a la reducción de luminosidad e índice de saturación, e incremento del ángulo de tono.

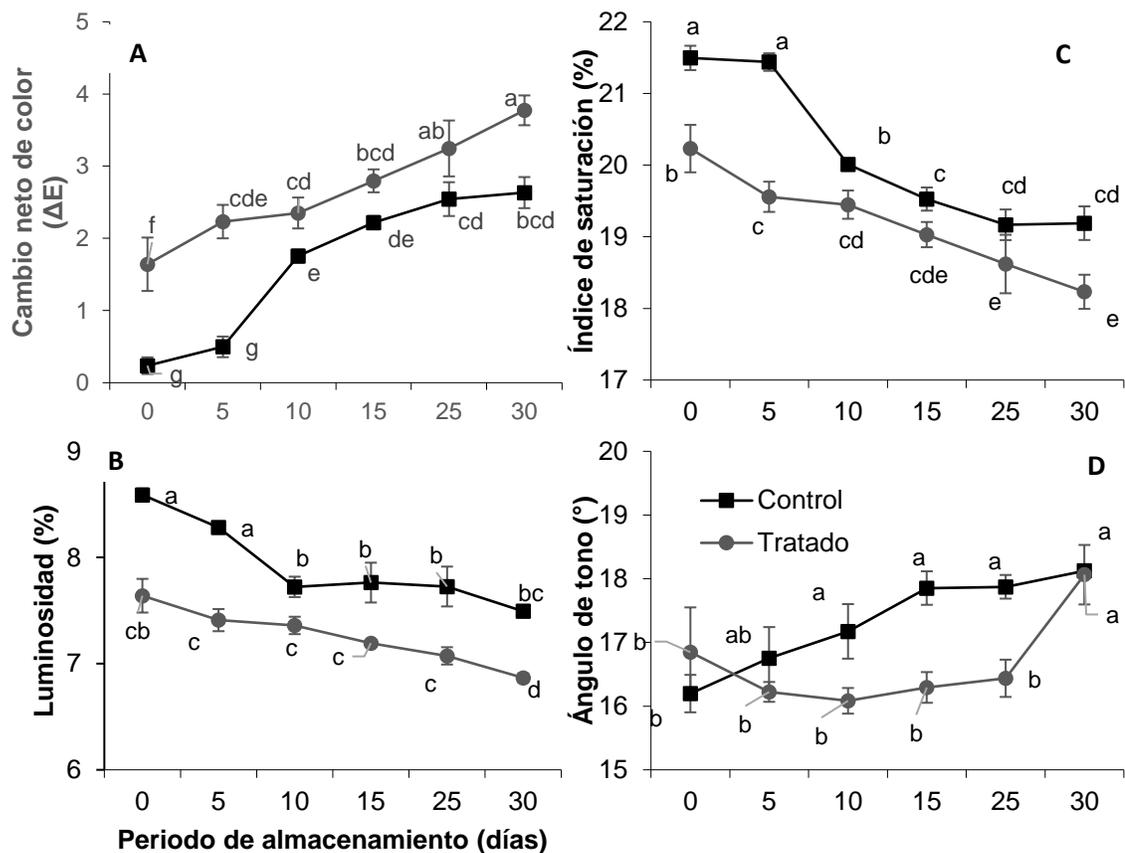


Figura 12. Cambios en los parámetros de color: cambio neto de color (A), luminosidad (B), índice de saturación de color (C) y ángulo de tono (D) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C). Jugo tratado= jugo ozonizado ($24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$) por 7 min, y después presurizado a 316 MPa (5 min). Barras verticales indican la desviación estándar. Medias con letras diferentes (por cada parámetro de color) indican diferencias significativas (prueba Tukey, $p < 0.05$).

El tratamiento con la combinación $7O_3+316MPa$ causó reducción (12.8 %) de la luminosidad e índice de saturación (5.9 %) en los jugos, esta disminución se observó inmediatamente después de la aplicación del tratamiento; aunque

también hubo una disminución durante el almacenamiento, hasta obtener una reducción de 22.8 % de luminosidad y 16.7 % de índice de saturación a los 30 d de almacenamiento. El ángulo de tono no fue afectado significativamente ($p=0.05$) por el tratamiento, pero se incrementó hasta 11.9 % en todos los jugos durante el almacenamiento.

Lo anterior sugiere que los jugos tratados mostraron un ligero oscurecimiento, con una ligera pérdida de intensidad de color, y tanto los jugos tratados como sin tratar mostraron un ligero amarillamiento durante el almacenamiento.

Esta modificación del color en los jugos tratados con $7O_3+316MPa$ pudo ser causada por la oxidación de algunos pigmentos responsables del color rojo, ya que se ha reportado que el procesamiento con ozono tiene un efecto negativo sobre los pigmentos debido a su fuerte actividad oxidante (Tiwari *et al.*, 2013).

Propiedades fitoquímicas y antioxidantes

El contenido total de betalaínas en los jugos sin tratar se redujo 14 % durante el almacenamiento y en los jugos tratados con $7O_3+316MPa$ se redujeron sólo 10 %; no obstante, la mayor (33 %) reducción (reducción de betacianinas: 2.22 a 1.61 y de betaxantinas: 2.13 a 1.30 mg mL⁻¹) fue la causada por el efecto inmediato del tratamiento (Cuadro 22). La disminución de las betalaínas durante el almacenamiento pudo ser provocada por la presencia de algunas enzimas que se mantuvieron activas después de la aplicación del tratamiento, como ha sido reportado por Garcia-Palazon *et al.* (2004) y Morales-de la Peña, Salinas-Roca, Escobedo-Avellaneda, Martín-Belloso, & Welti-Chanes (2018) en alimentos tratados con APH, sin embargo, también es posible que se hayan activado algunas enzimas oxidantes (peroxidasa y polifenoloxidasas) por efecto del estrés causado por la aplicación del ozono (Ong *et al.*, 2014).

De manera particular, las betaxantinas (reducción de 39 %) fueron más sensibles ($p < 0.05$) a la oxidación por el tratamiento, que las betacianinas (reducción de 27 %); asimismo, el almacenamiento afectó ($p < 0.05$) su concentración en los jugos, con una reducción de 6.21 y 15 % del contenido de betacianinas y

betaxantinas, respectivamente. Es notable que los jugos sin tratar mostraron estabilidad de las betacianinas durante el almacenamiento, mientras que las betaxantinas se redujeron en 25 % (Cuadro 23), esta reducción pudo ser provocada por efecto de algunas enzimas presentes en el jugo, ya que se ha reportado (Azeredo, 2009) que las betacianinas son más susceptibles a degradarse por la actividad enzimática que las betaxantinas, durante el almacenamiento. Otros investigadores indican la mayor estabilidad de las betacianinas que de las betaxantinas cuando son sometidas a la luz blanca (Moreno, Belén, & Vilorio, 2002) calor u oxígeno (Azeredo, 2009).

La dinámica de reducción por efecto de la aplicación de ozono en jugos o frutos intactos aún no ha sido reportada.

Cuadro 22. Cambios en el contenido de betalaínas y fenoles totales (mg mL⁻¹) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (5 ± 2 °C).

Día	Betalaínas totales		Fenoles totales	
	Sin tratar	7O ₃ +316MPa ^z	Sin tratar	7O ₃ +316MPa
0	4.34 ± 0.05 a ^y	2.90 ± 0.02 d	0.25 ± 0.00 a	0.24 ± 0.01 b
5	4.13 ± 0.03 b	2.81 ± 0.05 d	0.24 ± 0.00 a	0.23 ± 0.02 b
10	4.09 ± 0.11 b	2.76 ± 0.17 de	0.24 ± 0.00 a	0.22 ± 0.01 b
15	4.06 ± 0.14 b	2.71 ± 0.06 de	0.24 ± 0.00 a	0.22 ± 0.01 b
25	3.96 ± 0.03 b	2.69 ± 0.01 de	0.24 ± 0.00 a	0.22 ± 0.00 b
30	3.72 ± 0.03 c	2.61 ± 0.09 e	0.24 ± 0.02 a	0.21 ± 0.00 b

^z7O₃+316MPa= jugo ozonizado (24 mg L⁻¹ min⁻¹) por 7 min, y después presurizado a 316 MPa (5 min).

^yMedias con letras diferentes (por cada metabolito) indican diferencias significativas (prueba Tukey, p < 0.05).

Por otro lado, los fenoles totales también se redujeron en los jugos tratados, pero éstos presentaron estabilidad (p= 0.05) durante el almacenamiento.

De acuerdo con Jiménez-Aguilar *et al.* (2015) y Sandate-Flores *et al.* (2017), las betalaínas y los fenoles totales no son afectados por la APH; por lo tanto, la reducción de estos compuestos encontrada podría ser atribuída a la acción del ozono, ya que Tiwari *et al.* (2013) mencionaron que la degradación de fitoquímicos puede ser debido a la reacción directa con el ozono o con reacciones indirectas de oxidantes secundarios, tales como ·OH, HO^{2·}, ·O₂ y ·O₃; tales oxidantes pueden provocar reacciones nucleofílicas y electrofílicas sobre los

compuestos aromáticos que son sustituidos con un electrón donador (vg. OH⁻), lo que conlleva a la oxidación del metabolito. La acción del ozono molecular sobre la fracción aromática de los compuestos fenólicos favorece la formación de compuestos hidroxilados y quinonas (Asokapandian *et al.*, 2018); compuestos que pueden causar oscurecimiento de los alimentos que los contienen. De acuerdo con lo anterior, es posible que se hayan llevado a cabo estas reacciones oxidantes en los jugos tratados, lo que causó la disminución de su luminosidad (ver apartado de parámetros de color).

La disminución del contenido de compuestos fenólicos encontrada en el presente trabajo es menor (6 %) a la reportada en jugo de manzana (50 %) tratado únicamente con ozono (48 mg O₃ L⁻¹ durante 10 min) (Torres *et al.*, 2011), lo que sugiere que debido al bajo nivel de ozono empleado en el presente trabajo es posible la obtención de un jugo de pitaya con elevado contenido fenólico.

Cuadro 23. Cambios en el contenido de betacianinas y betaxantinas en el jugo de pitaya sin tratar, y tratado con la combinación ozono-APH, durante el almacenamiento a 5 ± 2 °C.

Storage time (d)	Betacianinas (mg mL ⁻¹)		Betaxantinas (mg mL ⁻¹)	
	Untreated	7O ₃ + 316 MPa ^z	Untreated	7O ₃ + 316 MPa
0	2.22 ± 0.01 a ^y	1.61 ± 0.04 b	2.13 ± 0.05 a	1.30 ± 0.02 e
5	2.16 ± 0.03 a	1.55 ± 0.01 b	1.97 ± 0.00 b	1.27 ± 0.03 e
10	2.12 ± 0.10 a	1.54 ± 0.07 b	1.96 ± 0.01 b	1.23 ± 0.10 e
15	2.12 ± 0.11 a	1.52 ± 0.01 b	1.94 ± 0.03 b	1.19 ± 0.04 f
25	2.11 ± 0.01 a	1.52 ± 0.01 b	1.84 ± 0.02 c	1.17 ± 0.02f g
30	2.13 ± 0.02 a	1.51 ± 0.01 b	1.59 ± 0.01 d	1.10 ± 0.1 g

^z7O₃ + 316 MPa= jugo ozonizado (24 mg L⁻¹ min⁻¹) por 7 min, y después presurizado a 316 MPa (5 min).

^yLetras diferentes (por cada metabolito) indican diferencias significativas (prueba Tukey, p=0.05).

Aunque la AA se evaluó mediante el método del radical ABTS y DPPH, con ambos métodos se observó reducción de la AA inmediatamente después de la aplicación del tratamiento 7O₃+316MPa; sin embargo, con el método ABTS, el cual fue el de mayor consistencia (por detectar diferencias durante el almacenamiento) se observó una reducción de 29 % (Cuadro 24). Durante el almacenamiento se observó una reducción de 13-15 % en ambos jugos (tratados y sin tratar). La reducción de la AA se correlaciona positivamente (p = 0.0001)

con la reducción de betalaínas ($r = 96 \%$) y fenoles totales ($r = 73 \%$) por efecto de la aplicación del tratamiento $7O_3+316MPa$. Esto es consistente con lo reportado por algunos autores, quienes mencionan que tanto las betalaínas como los compuestos fenólicos contribuyen con la AA en pitaya (Leticia García-Cruz *et al.*, 2016; Carlos E. Ochoa-Velasco & Guerrero Beltrán, 2013) y en tuna (Ramírez-Ramos *et al.*, 2015).

Cuadro 24. Cambios en la actividad antioxidante (μm equivalentes de Trolox mL^{-1}) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado ($5 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Periodo de almacenamiento (días)	ABTS		DPPH	
	Sin tratar	$7O_3+316MPa^z$	Sin tratar	$7O_3+316MPa$
0	$1.07 \pm 0.02 \text{ a}^y$	$0.76 \pm 0.06 \text{ c}$	$1.63 \pm 0.22 \text{ a}$	$1.18 \pm 0.13 \text{ b}$
5	$1.03 \pm 0.04 \text{ a}$	$0.71 \pm 0.05 \text{ cd}$	$1.60 \pm 0.09 \text{ a}$	$1.17 \pm 0.12 \text{ b}$
10	$1.01 \pm 0.04 \text{ a}$	$0.70 \pm 0.01 \text{ cd}$	$1.61 \pm 0.03 \text{ a}$	$1.09 \pm 0.09 \text{ b}$
15	$1.01 \pm 0.06 \text{ a}$	$0.68 \pm 0.08 \text{ d}$	$1.58 \pm 0.11 \text{ a}$	$1.09 \pm 0.09 \text{ b}$
25	$0.97 \pm 0.01 \text{ ab}$	$0.68 \pm 0.05 \text{ d}$	$1.59 \pm 0.03 \text{ a}$	$1.07 \pm 0.13 \text{ b}$
30	$0.91 \pm 0.02 \text{ bc}$	$0.66 \pm 0.02 \text{ d}$	$1.48 \pm 0.03 \text{ a}$	$1.04 \pm 0.00 \text{ b}$

^z $7O_3 + 316 \text{ MPa}$ = jugo ozonizado ($24 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$) por 7 min, y después presurizado a 316 MPa (5 min). ^yLetras diferentes (para cada método) indican diferencias significativas (prueba Tukey, $p < 0.05$).

Evaluación sensorial

Los resultados de la prueba 2-Selección Alternativa Forzada resultaron muy promisorios, dado que éstos indicaron que el 79 % de los juicios de los panelistas (consumidores de pitaya) prefirieron el jugo tratado con O_3 -APH y almacenado por 30 d que el jugo sin tratar (Cuadro 25). Esto sugiere de además de que este jugo se mantuvo inocuo durante 30 d, sus características sensoriales se mejoraron. De acuerdo con los comentarios por diversos panelistas al final de la prueba (de manera voluntaria), la mejora de estas propiedades pudo ser causada por un posible cambio en la viscosidad por efecto del ozonizado, como lo ha reportado Jaramillo-Sánchez, Garcia-Loredo *et al.* (2018) y Torres *et al.* (2011) en jugo de durazno (60 mg durante 0.3-12 min) y manzana (10 - $48 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ por 10 min), respectivamente. No obstante, la viscosidad no fue evaluada en el presente estudio.

Cuadro 25. Resultados de la prueba de preferencia aplicada en jugo de pitaya sin tratar y tratado con la combinación ozono-APH.

Sin tratar	7O ₃ + 316 MPa ^z
89 a ^y	23 b

^z7O₃ + 316 MPa= jugo ozonizado (24 mg L⁻¹ min⁻¹) por 7 min, presurizado a 316 MPa (5 min) y almacenado durante 30 d

^yMedias con letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de chi-cuadrada (p < 0.05)

6.5. Conclusiones

S. cerevisiae fue más sensible a las APH y *L. innocua* al efecto del ozono. La aplicación de 7 min de ozono (24 mg L⁻¹ min⁻¹) más 316 MPa de presión (5 min) mostró el mejor efecto sinérgico para la inactivación de más de 5 log (UFC mL⁻¹) la población de *L. innocua* en jugo de pitaya. La aplicación de esta combinación mantuvo inocuo el jugo de pitaya por 30 d (5 ± 2 °C); sin embargo, por efecto del tratamiento se disminuyó la luminosidad e índice de saturación de color, y por efecto del almacenamiento se incrementó el ángulo de tono. Asimismo, los jugos tratados presentaron menor contenido de compuestos bioactivos y actividad antioxidante. Durante el almacenamiento, tanto el contenido de betalainas como la actividad antioxidante en los jugos tratados disminuyó. A pesar de los cambios ocurridos en los jugos tratados, se observó un incremento de su preferencia sensorial en comparación con los jugos sin tratar. Por lo tanto, la combinación ozono-HHP puede ser explorada en otros jugos, con la finalidad de mantenerlos inocuos con elevada aceptabilidad sensorial.

6.6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca (265456) otorgada a Quiroz-González para cursar sus estudios de doctorado, a la Universidad Autónoma Chapingo (Proyecto convencional 17076-C 2017), a la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente al Dr. Alberto Tecante Coronel y a la I.A. Mariana Ramírez Gilly por el apoyo en la fase experimental.

6.7. Literatura citada

Armella, M. A., Soriano, J. S., & Ramírez, G. R. (2003). Phenology, Postharvest Physiology and Marketing (*Stenocereus griseus*, L.) as a Sustainable

Resource of Pitaya. *Acta Horticulturae*, 598, 251–254, 10.17660/ActaHortic.2003.598.37.

- Asokapandian, S., Periasamy, S., & Swamy G. (2018). Chapter 25. Ozone for fruit juice preservation. In Rajauria G., & Tiwari B. K. (Eds.), *Fruit juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis*. UK: Elsevier.
- Azeredo, H. M. C. (2009). Betalains: Properties, sources, applications, and stability - A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 2365–2376, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>.
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99, 191–203, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>.
- Birch, R. M., & Walker, G. M. (2000). Influence of magnesium ions on heat shock and ethanol stress responses of *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme and Microbial Technology*, 26, 678–687, [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00159-9).
- Bozoglu, F., Alpas, H., & Kaletunç, G. (2004). Injury recovery of foodborne pathogens in high hydrostatic pressure treated milk during storage. *FEMS Immunology and Medical Microbiology*, 40, 243–247, [https://doi.org/10.1016/S0928-8244\(04\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0928-8244(04)00002-1).
- Bruschi, C., Komora, N., Castro, S. M., Saraiva, J., Ferreira, V. B., & Teixeira, P. (2017). High hydrostatic pressure effects on *Listeria monocytogenes* and *L. innocua*: Evidence for variability in inactivation behaviour and in resistance to pediocin bacHA-6111-2. *Food Microbiology*, 64, 226–231, <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.01.011>.
- Carlo, G., Novellino, E., & Basile, A. (2011). Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts. *Journal of Functional Foods*, 4, 129–136, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.09.003>.
- Cheftel, J. C. (1995). Review: High-pressure, microbial inactivation and food preservation. *Food Science and Technology International*, 1, 75–90, <https://doi.org/10.1177/108201329500100203>.
- Díaz, M. L., & Morales, R. M. A. (2012). *Estadística multivariada: inferencia y métodos*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- FDA. (2001). Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP); Procedures for the Safe and Sanitary Processing and Importing of Juices. *Federal Register*, 66, 6137–6202.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, Chemical, and Antioxidant Activity Characterization of Pitaya (*Stenocereus pruinosus*) Fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68, 403–410, <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0391-8>.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Luna-Morales, C.

- del C. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69–76, <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.004>.
- García-Palazon, A., Suthanthangjai, W., Kajda, P., & Zabetakis, I. (2004). The effects of high hydrostatic pressure on β -glucosidase, peroxidase and polyphenoloxidase in red raspberry (*Rubus idaeus*) and strawberry (*Fragaria x ananassa*). *Food Chemistry*, 88, 7–10, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.019>.
- García-Suárez, F., Carreto-Montoya, L., Cárdenas-Navarro, R., Díaz-Pérez, J. C., & López-Gómez, R. (2007). Pitaya (*Stenocereus stellatus*) fruit growth is associated to wet season in Mexican dry tropic. *PHYTON International Journal of Experimental Botany*, 76, 19–26.
- García, L. A. B., Guerrero, S. N., & Alzamora, S. M. (2015). Inactivation kinetics and growth dynamics during cold storage of *Escherichia coli* ATCC 11229, *Listeria innocua* ATCC 33090 and *Saccharomyces cerevisiae* KE162 in peach juice using aqueous ozone. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 29, 271–279, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.02.007>.
- Gengatharan, A., Dykes, G. A., & Choo, W. S. (2015). Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT - Food Science and Technology*, 64, 645–649, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.052>.
- Hayek, S. A., & Ibrahim, S. A. (2012). Antimicrobial Activity of Xoconostle Pears (*Opuntia matudae*) against *Escherichia coli* O157:H7 in Laboratory Medium. *International Journal of Microbiology*, 2012, 6–12, <https://doi.org/10.1155/2012/368472>
- Hernández-Montes, A. (2007). *Evaluación sensorial de productos agroalimentarios*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Jaramillo-Sánchez, G. M., García-Loredo, A. B., Gómez, P. L., & Alzamora, S. M. (2018). Ozone Processing of Peach Juice: Impact on Physicochemical Parameters, Color, and Viscosity. *Ozone: Science and Engineering*, 40, 305–312, <https://doi.org/10.1080/01919512.2017.1417111>.
- Jiménez-Aguilar, D. L., Escobedo-Avellaneda, Z., Martín-Belloso, O., Gutiérrez-Urbe, J., Valdez-Fragoso, A., García-García, R., ... Welte-Chanes, J. (2015). Effect of High Hydrostatic Pressure on the Content of Phytochemical Compounds and Antioxidant Activity of Prickly Pears (*Opuntia ficus-indica*) Beverages. *Food Engineering Reviews*, 7, 198–208, <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9111-5>.
- Lado, B. H., & Yousef, A. E. (2002). Alternative food-preservation technologies: Efficacy and mechanisms. *Microbes and Infection*, 4, 433–440, [https://doi.org/10.1016/S1286-4579\(02\)01557-5](https://doi.org/10.1016/S1286-4579(02)01557-5).
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices. In Lawless H. T., & Heymann H. (Eds.), *Sensory Evaluation*

- of Food: Principles and Practices* (2nd ed.). U.S.: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6488-5>
- Leyva-Daniel, D. E., Escobedo-Avellaneda, Z., Villalobos-Castillejos, F., Alamilla-Beltrán, L., & Welti-Chanes, J. (2017). Effect of high hydrostatic pressure applied to a Mexican honey to increase its microbiological and functional quality. *Food and Bioprocess Processing*, 102, 299–306, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.01.001>.
- Ludikhuyze, L., & Hendrich, M. E. G. (2001). Effects of High Pressure on Chemical Reactions Related to food Quality. In Hendrickx M. E. G., & Knorr D. (Eds.), *Ultra High Pressure Treatments of Foods*. U.S.: Springer Science+ Business Media, LLC.
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27, 1254–1255.
- Morales-de la Peña, M., Salinas-Roca, B., Escobedo-Avellaneda, Z., Martín-Belloso, O., & Welti-Chanes, J. (2018). Effect of High Hydrostatic Pressure and Temperature on Enzymatic Activity and Quality Attributes in Mango Puree Varieties (cv. Tommy Atkins and Manila). *Food and Bioprocess Technology*, 11, 1211–1221, <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2090-9>.
- Mozhaev, V. V., Heremans, K., Frank, J., Masson, P., & Balny, C. (1994). Exploiting the effects of high hydrostatic pressure in biotechnological applications. *Trends in Biotechnology*, 12, 493–501, [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0167-7799(94)90057-4).
- Ochoa-Velasco, C. E., & Guerrero Beltrán, J. Á. (2013). Short-wave ultraviolet-C light effect on pitaya (*Stenocereus griseus*) juice inoculated with *Zygosaccharomyces bailii*. *Journal of Food Engineering*, 117, 34–41, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.020>.
- Ong, M. K., Ali, A., Alderson, P. G., & Forney, C. F. (2014). Effect of different concentrations of ozone on physiological changes associated to gas exchange, fruit ripening, fruit surface quality and defence-related enzymes levels in papaya fruit during ambient storage. *Scientia Horticulturae*, 179, 163–169, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.004>.
- Patil, S., Bourke, P., Frias, J. M., Tiwari, B. K., & Cullen, P. J. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* in orange juice using ozone. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10, 551–557, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.05.011>.
- Pérez-Loredo, M. G., García-Ochoa, F., & Barragán-Huerta, B. E. (2016). Comparative Analysis of Betalain Content in *Stenocereus Stellatus* Fruits and Other Cactus Fruits Using Principal Component Analysis. *International Journal of Food Properties*, 19, 326–338, <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1022259>.
- Quiroz-González, B., Rodríguez-Martínez, V., del Rosario García-Mateos, M., Antonio Torres, J., & Welti-Chanes, J. (2018). High hydrostatic pressure

- inactivation and recovery study of *Listeria innocua* and *Saccharomyces cerevisiae* in pitaya (*Stenocereus pruinosus*) juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 50, 169–173. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.003>.
- Ramaswamy, V., Cresence, V. M., Rejitha, J. S., Lekshmi, M. U., Dharsana, K. S., Prasad, S. P., & Vijila, H. M. (2007). *Listeria*-review of epidemiology and pathogenesis. *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*, 40, 4–13.
- Ramírez-Ramos, M., García-Mateos, M. del R., Corrales-García, J., Ybarra-Moncada, C., & Castillo-González, A. M. (2015). Compuestos antioxidantes en variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38, 349–357.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26, 1231–1237, [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rodoni, L., Casadei, N., Concellón, A., Chaves Alicia, A. R., & Vicente, A. R. (2010). Effect of short-Term ozone treatments on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit quality and cell wall degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 594–599, <https://doi.org/10.1021/jf9029145>.
- Sánchez-Rangel, J. C., Benavides, J., Heredia, J. B., Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2013). The Folin-Ciocalteu assay revisited: Improvement of its specificity for total phenolic content determination. *Analytical Methods*, 5, 5990–5999, <https://doi.org/10.1039/c3ay41125g>.
- Sandate-Flores, L., Rostro-Alanis, M. de J., Mancera-Andrade, E. I., Esquivel-Hernandez, D. A., Brambila-Paz, C., Parra-Saldívar, R., ... Rodríguez-Rodríguez, J. (2017). Using high hydrostatic pressures to retain the antioxidant compounds and to reduce the enzymatic activity of a pitaya-pineapple (*Stenocereus* sp.-*Fragaria ananassa*) beverage. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 611–619, <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2482-7>
- Secretaría-de-Salud. (1995). *NOM-130-SSA1-1995. Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias*. México: Secretaría de Salud.
- Thanomsub, B., Anupunpisit, V., Chanphetch, S., & Watcharachaipong, T. (2002). Effects of ozone treatment on cell growth and ultrastructural changes in bacteria. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 199, 193–199, <https://doi.org/10.2323/jgam.48.193>.
- Tiwari, B. K., Cullen, P., Brennan, C. S., & O'Donnell, C. P. (2013). Non thermal processing. In Tiwari B. K., Brunton, N. P., & Brennan C. S. (Eds.), *Handbook of Plant Food Phytochemicals*. UK: Wiley-Blackwell.

- Tiwari, B. K., O'donnell, C. P., & Cullen, P. J. (2009). Effect of non thermal processing technologies on the anthocyanin content of fruit juices. *Trends in Food Science & Technology*, 20, 137–145.
- Torlak, E. (2014). Efficacy of ozone against Alicyclobacillus acidoterrestris spores in apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 172, 1–4, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.035>.
- Torres, B., Tiwari, B. K., Patras, A., Wijngaard, H. H., Brunton, N., Cullen, P. J., & O'Donnell, C. P. (2011). Effect of ozone processing on the colour, rheological properties and phenolic content of apple juice. *Food Chemistry*, 124, 721–726. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.050>.
- Trujillo, A. J. (2002). Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products. *High Pressure Research*, 22, 619–626, <https://doi.org/10.1080/08957950212449>.
- Villarreal-Lozoya, J. E., Lombardini, L., & Cisneros-Zevallos, L. (2007). Phytochemical constituents and antioxidant capacity of different pecan [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] cultivars. *Food Chemistry*, 102, 1241–1249, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.024>.
- Wang, Z., & Goonewardene, L. A. (2004). The use of MIXED models in the analysis of animal experiments with repeated measures data. *Canadian Journal of Animal Science*, 84, 1–11, <https://doi.org/10.4141/A03-123>.

7. CONCLUSIONES GENERALES

Las mejores condiciones de procesamiento con APH para la obtención de un jugo de pitaya inocuo, con efecto letal sobre la población de *L. innocua* y *S. cerevisiae* fueron: 550 MPa por 16 min y 600 MPa por 12 min.

La aplicación de los tratamientos 550 MPa por 16 min y 600 MPa por 12 min en jugo de pitaya puede ser una alternativa para mantenerlo inocuo (por reducción de microbiota nativa) durante 60 d (4 ± 1 °C) con elevada aceptabilidad sensorial y calidad nutracéutica, sin la modificación de su comportamiento reológico y con una baja actividad de la enzima PME y bajo cambio neto de color.

La aplicación de 316 MPa durante 5 min con una aplicación previa de 7 min de ozono ($24 \text{ mg min}^{-1} \text{ L}^{-1}$) en jugo de pitaya puede provocar un efecto biocida sinérgico, el cual puede ser una alternativa para mantener el jugo de pitaya inocuo (sin microbiota nativa) durante 30 d (5 ± 2 °C) con elevada preferencia sensorial. Sin embargo, la aplicación de este tratamiento causa la reducción de la luminosidad, el ángulo de tono y componentes nutracéuticos.

8. APÉNDICES

6.1. Cuadros de datos no mostrados en el texto

Cuadro 26. Efecto del *Come-Up Time* (CUT) sobre la inactivación de *Saccharomyces cerevisiae* en jugo de pitaya.

CUT (s) ^z	Presión (MPa) ^y	\log_{10} (N/No)
35	400	-7.3 ± 0.3 a ^x
85	430	-7.3 ± 0.3 a
96	500	-7.3 ± 0.3 a
108	570	-7.3 ± 0.3 a
116	600	-7.3 ± 0.3 a

^zCUT= tiempo requerido para alcanzar la presión de procesamiento.

^yEl tiempo de procesamiento para cada nivel de presión fue de 1 s.

^xMedias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (prueba Tukey, $p > 0.05$).

Cuadro 27. Parámetros reológicos n y K de jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C.

Día	n ^z			K ^y			R ²		
	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
	0	0.51 ± 0.01 a	0.46 ± 0.03 a,A ^y	0.47 ± 0.02 a,A	8.95 ± 0.22 a	6.83 ± 0.94 a,A	7.19 ± 0.44 a,A	0.99	0.96
5	0.45 ± 0.06 a	0.48 ± 0.00 a,A	0.46 ± 0.04 a,A	6.48 ± 2.49 a	7.71 ± 0.43 a,A	7.48 ± 0.75 a,A	0.98	0.97	0.97
10	0.46 ± 0.03 a	0.49 ± 0.02 a,A	0.47 ± 0.01 a,A	7.24 ± 1.16 a	7.63 ± 0.67 a,A	7.35 ± 0.45 a,A	0.97	0.98	0.96
15	0.49 ± 0.04 a	0.48 ± 0.02 a,A	0.48 ± 0.02 a,A	8.00 ± 2.38 a	7.02 ± 0.62 a,A	7.72 ± 1.24 a,A	0.98	0.97	0.97
25	-	0.45 ± 0.04 A	0.47 ± 0.01 A	-	6.53 ± 1.28 A	6.97 ± 0.43 A	-	0.98	0.98
30	-	0.44 ± 0.02 A	0.48 ± 0.02 A	-	5.19 ± 0.54 A	6.47 ± 0.98 A	-	0.97	0.98
45	-	0.44 ± 0.02 A	0.46 ± 0.04 A	-	5.61 ± 0.57 A	7.00 ± 1.87 A	-	0.95	0.96
60	-	0.43 ± 0.02 A	0.44 ± 0.03 A	-	5.19 ± 0.85 A	6.77 ± 0.89 A	-	0.97	0.97

^zn= índice de consistencia (Pa·sⁿ); ^yK= índice de flujo. ^yLetras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d. No existe diferencia significativa (en cada variable) entre los valores que comparten la misma letra (prueba Tukey, p > 0.05).

Cuadro 28. Cambios de pH y SST en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C.

Día	pH			SST (°Bx)		
	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
0	5.25 ± 0.00 a ^y	5.25 ± 0.00 a,A	5.25 ± 0.00 a,A	10.00 ± 0.00 a	10.00 ± 0.00 a,A	10.00 ± 0.00 a,A
5	5.20 ± 0.01 b	5.24 ± 0.01 a,A	5.24 ± 0.01 a,A	10.00 ± 0.00 a	10.00 ± 0.00 a,A	10.00 ± 0.00 a,A
10	5.18 ± 0.01 c	5.24 ± 0.01 a,A	5.24 ± 0.01 a,A	10.00 ± 0.00 a	10.00 ± 0.00 a,A	10.00 ± 0.00 a,A
15	5.11 ± 0.01 d	5.24 ± 0.01 a,B	5.23 ± 0.01 b,B	10.00 ± 0.00 a	10.00 ± 0.00 a,A	10.00 ± 0.00 a,A
25	-	5.23 ± 0.01 B	5.23 ± 0.00 B	-	10.00 ± 0.00 A	10.00 ± 0.00 A
30	-	5.23 ± 0.00 B	5.23 ± 0.00 B	-	10.00 ± 0.00 A	10.00 ± 0.00 A
35	-	5.22 ± 0.01 C	5.22 ± 0.01 C	-	10.00 ± 0.00 A	9.93 ± 0.12 A
45	-	5.22 ± 0.01 C	5.22 ± 0.01 C	-	10.00 ± 0.00 A	9.87 ± 0.12 A
60	-	5.22 ± 0.00 C	5.22 ± 0.00 C	-	9.93 ± 0.12 A	9.93 ± 0.12 A

^yLetras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d. No existe diferencia significativa (en cada variable) entre los valores que comparten la misma letra (prueba Tukey, p > 0.05).

Cuadro 29. Cambios en luminosidad e índice de saturación de color en jugo de pitaya durante el almacenamiento a 4 ± 1 °C.

Día	Luminosidad (%)			Índice de saturación		
	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min	Sin tratar	550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
0	4.2 ± 0.0 a ^y	4.3 ± 0.0 a,E	4.3 ± 0.0 a,E	19.8 ± 0.1 a	19.9 ± 0.0 a,A	19.9 ± 0.1 a,A
5	3.9 ± 0.1 b	4.3 ± 0.0 a,D	4.3 ± 0.0 a,D	18.9 ± 0.1 b	20.1 ± 0.7 a,A	20.2 ± 0.2 a,A
10	3.7 ± 0.6 ab	4.3 ± 0.0 a,D	4.3 ± 0.0 a,D	18.8 ± 0.6 b	20.0 ± 0.0 a,A	20.2 ± 0.1 a,A
15	3.4 ± 0.3 c	4.3 ± 0.0 a,CD	4.3 ± 0.0 a,CD	18.6 ± 0.8 b	20.7 ± 0.7 a,A	20.6 ± 0.5 a,A
25	-	4.3 ± 0.0 BC	4.4 ± 0.0 BC	-	20.1 ± 0.4 A	20.1 ± 0.5 A
30	-	4.3 ± 0.0 B	4.3 ± 0.0 B	-	20.3 ± 0.7 A	20.2 ± 0.1 A
35	-	4.4 ± 0.0 B	4.4 ± 0.0 B	-	20.3 ± 0.8 A	20.7 ± 1.1 A
45	-	4.4 ± 0.0 A	4.4 ± 0.0 A	-	20.7 ± 0.7 A	20.3 ± 0.1 A
60	-	4.4 ± 0.0 A	4.4 ± 0.0 A	-	20.2 ± 1.1 A	20.3 ± 0.1 A

^yLetras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d. No existe diferencia significativa (en cada variable) entre los valores que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$).

Cuadro 30. Cambios en el contenido de betaxantinas (mg g^{-1} bs) en jugo de pitaya durante el almacenamiento refrigerado (4 ± 1 °C).

Día	Sin tratar	Betaxantinas	
		550 MPa 16 min	600 MPa 12 min
0	21.1 ± 1.8 a ^y	20.1 ± 0.9 a,A	19.5 ± 0.9 a,A
5	21.6 ± 1.1 a	20.2 ± 0.7 a,A	19.4 ± 2.1 a,A
10	20.9 ± 1.5 a	20.7 ± 0.6 a,A	20.4 ± 0.7 a,A
15	20.5 ± 1.1 a	20.9 ± 0.4 a,A	19.6 ± 0.8 a,A
25	-	20.6 ± 0.7 a,A	20.7 ± 1.0 a,A
30	-	20.3 ± 0.9 a,A	21.2 ± 0.9 a,A
35	-	19.8 ± 1.1 a,A	18.9 ± 1.3 a,A
45	-	19.2 ± 0.9 a,A	19.0 ± 0.6 a,A
60	-	19.2 ± 1.7 a,A	19.2 ± 0.4 a,A

^yLetras minúsculas indican el análisis estadístico de todos los jugos almacenados por 15 d, y letras mayúsculas indican sólo el análisis de los jugos tratados y almacenados por 60 d. No existe diferencia significativa entre los valores que comparten la misma letra (prueba Tukey, $p > 0.05$).

6.2. Figuras no mostradas en el texto

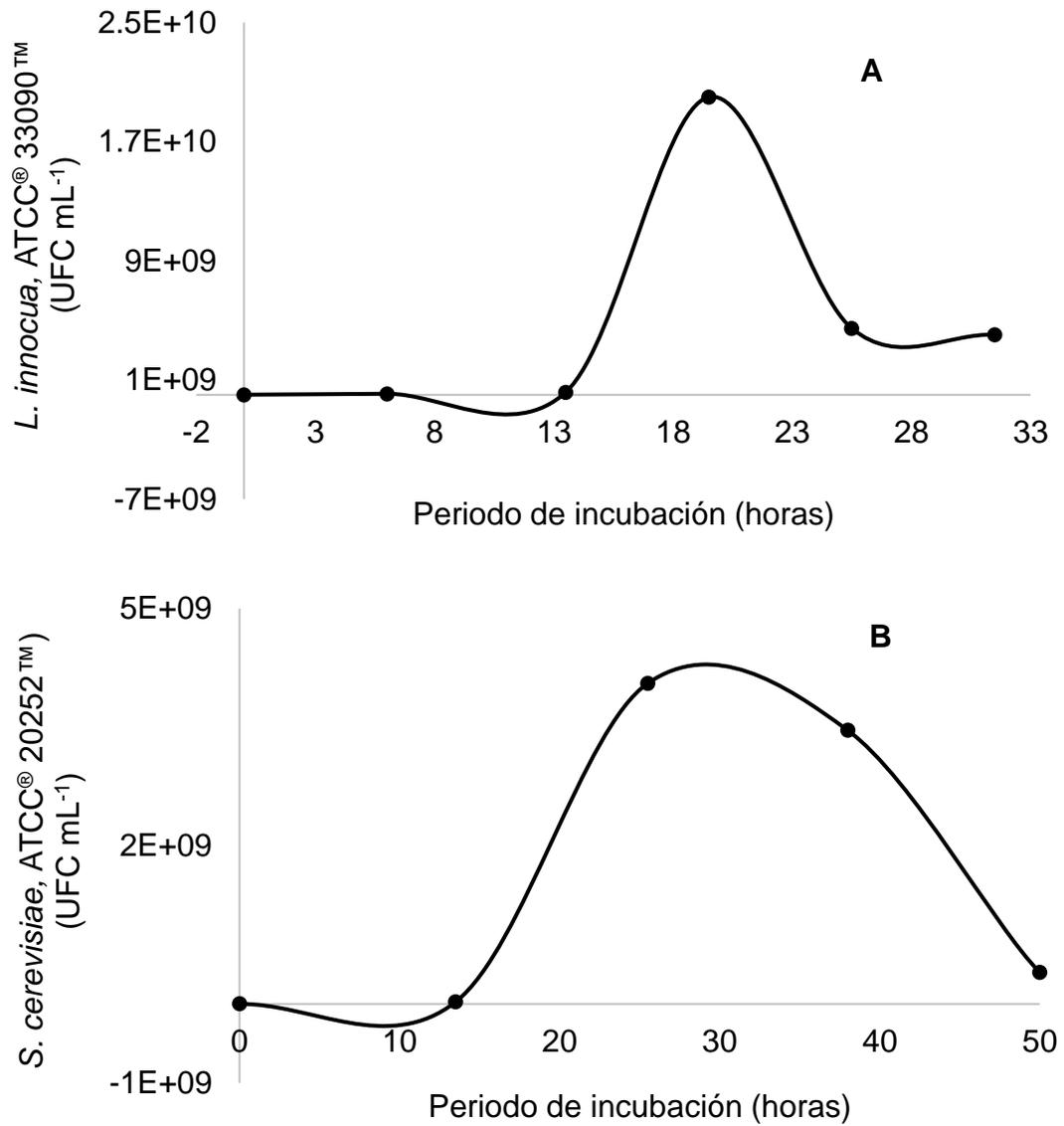


Figura 13. Curva de crecimiento de *L. innocua* (A) y *S. cerevisiae* (B).

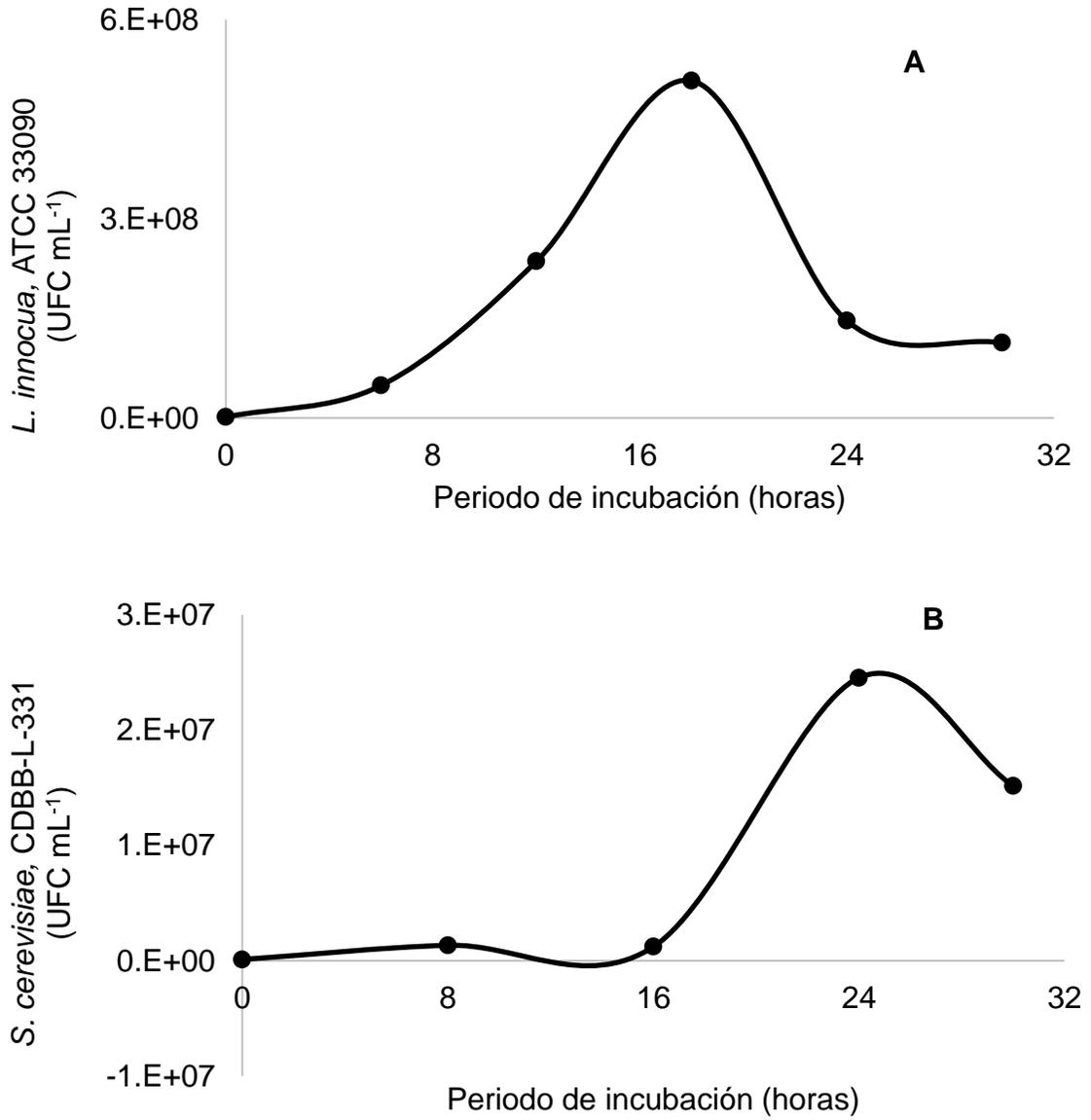


Figura 14. Curva de crecimiento de *L. innocua* (A) y *S. cerevisiae* (B).

6.3. Evidencias de participación en Congresos

IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas



V Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas



International Nonthermal Processing Workshop and Short Course 2018

September 25 – Morning session – 2018 International Nonthermal Processing Workshop and Short Course

The effect of pressure on the kinetics of EGCG degradation – implications to hyperbaric storage

H. Shkolnikov, V. Belochvostov, Z. Okun, Avi Shpigelman

Israel Institute of Technology – Technion, Israel

Continuous UV-C treatment of packed meat products

Hanna Harmeling¹, K. Aganovic¹, V. Heinz¹, P. Muranyi²

¹*German Institute of Food Technologies – DIL e.V. Germany*

²*Fraunhofer Institute IVV, Germany*

Refrigerated microbial, enzymatic, nutraceutical and organoleptic stability of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) juice processed by high hydrostatic pressure

B. Quiroz-González¹, V. Rodríguez Martínez², M.d.R. García-Mateos¹, J. Antonio Torres², J. Welti-Chanes²

¹*Universidad Autónoma Chapingo, Mexico*

²*Tecnológico de Monterrey, México*

Hyperbaric storage of ground beef and turkey under uncontrolled room temperature

X. Wu², K. Deng², J. Du², V. Rodríguez Martínez¹, J. Welti-Chanes¹, J. Antonio Torres^{1,2}

¹*Tecnológico de Monterrey, México*

²*Oregon State University, USA*

6.4. Evidencias de publicación de artículos científicos Innovative Food Science and Emerging Technologies

Innovative Food Science and Emerging Technologies 50 (2018) 169–173



Contents lists available at ScienceDirect

Innovative Food Science and Emerging Technologies

Journal homepage: www.elsevier.com/locate/IFSET



High hydrostatic pressure inactivation and recovery study of *Listeria innocua* and *Saccharomyces cerevisiae* in pitaya (*Stenocereus pruinosus*) juice



Beatriz Quiroz-González^a, Verónica Rodríguez-Martínez^b, María del Rosario García-Mateos^c,
J. Antonio Torres^{b,*}, Jorge Welti-Chanes^{b,**}

^a Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, MEX 56230, Mexico

^b Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Centro de Biotecnología FEMSA, Monterrey, NL 64849, Mexico

^c Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, MEX 56230, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:
Fruit juice
Non-thermal technology
Come-up time
Recovery
Gram-positive bacteria

ABSTRACT

The high hydrostatic pressure (HHP) inactivation of *Listeria innocua* and *Saccharomyces cerevisiae* was investigated in pitaya juice subsequently stored 15 d under refrigeration to assess recovery. Juice inoculated to 7.6 ± 0.4 or $7.3 \pm 0.3 \log_{10}$ (CFU mL⁻¹) of *L. innocua* or *S. cerevisiae*, respectively, was treated at 400 to 600 MPa for 7.6 to 15 min ($T_{\text{initial}} = 19.5 \pm 2.8$ °C and $T_{\text{max}} = 34.6 \pm 2.0$ °C) following a Response Surface Design. Come-up time (CUT), defined as pressure release 1 s after reaching pressure set-point, was also evaluated. After a 400 MPa CUT treatment, no viable *S. cerevisiae* survivors were observed. Treatments at 550 and 600 MPa for 16 and 12 min, respectively, achieved *L. innocua* reductions exceeding 5- \log_{10} . No viable *S. cerevisiae* were observed when treated juice was stored at 4 ± 1 °C for up to 15 d. HHP appears a viable nonthermal alternative to produce a microbiologically safe and stable pitaya juice.

Pitaya (*Stenocereus* spp.): an under-utilized fruit

Beatriz Quiroz-González¹, Rosario García-Mateos^{2*}, J. Joel E. Corrales-García¹,
María Teresa Colinas-León²

¹ Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo.

² Instituto de Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo.
Km. 38.5 Carretera México-Tezcoco, México. 56230.

*Corresponding author: rosqar08@hotmail.com

Received: May 2, 2018; Accepted: August 14, 2018.

ABSTRACT

Pitaya (*Stenocereus* spp.) is an exotic fruit, which has been consumed since ancient times by pre-Hispanic cultures. Recently in Mexico, this cactus has been the target of commercial attention due to the pleasant taste of their succulent fruits with juicy and sweet pulp, and a great variety of colors (white, yellow, purple and red fruits). This fruit has excellent sensory, nutritional, nutraceutical, agroindustrial and medicinal attributes; however, it has been under-utilized. The high content of betalains in this fruit allows us to consider these varieties as a source of natural pigments to be used in the food industry. The aim of this study is to show "the state of the art" of the properties of *Stenocereus*, to promote its study, dissemination, production, consumption and agroindustrial use. The present study shows a description of its botany, distribution, cultivation, physiology, pre and postharvest aspects, nutritional and nutraceutical composition, as well as agroindustrial and medicinal uses. The production of this fruit represents an opportunity for the economic development of some arid and semi-arid zones of Mexico due to the agronomic, nutraceutical and agroindustrial advantages. Therefore, more studies are required, mainly on physiological, nutraceutical, medicinal and agroindustrial aspects, more specifically on the non-studied species of *Stenocereus*, and future researches should deal with development of agro-technologies to guarantee high yields and good quality products to enable growers to make a living from it.

Keywords: *Stenocereus*, cactus, antioxidants, exotic, agroindustrial uses.

INTRODUCTION

The pitayo tree is a columnar cactus belonging to the genus *Stenocereus* (Bravo and Sánchez-Mejorada, 1991). The name derives from the Greek words: "στενός" (*stenos*) meaning "tight or narrow", referring to the narrow ribs of plants, and *cereus* meaning "candle". 22 to 24 edible species of this genus have been reported in America (Terrazas et al., 2005; Rosales-Bustamante et al., 2009); 20 of these species are endemic to Mexico (Arreola-Nava, 1999; Bárcenas and Jiménez, 2010). Therefore, Mexico could be considered the center of origin, being the country with the largest and most important cactus diversity (Esquivel, 2004; Reyes-Agüero, 2006; Novoa et al., 2015).

Recently, this cactus has been the target of commercial attention due to the pleasant taste of their succulent fruits with juicy and sweet pulp, and a great variety of colors (white, yellow, purple and red) (Campos-Rojas et al., 2011; García-Cruz et al., 2012), but this fruit has