



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

**COMPORTAMIENTO POSCOSECHA DE FRUTOS DE CIRUELA MEXICANA
(*Spondias purpurea*) EN ATMÓSFERAS MODIFICADAS CON
MICROPERFORADO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA



Presenta:

DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

ADRIANA HERRERO GALINDO

Bajo la supervisión de: María Teresa Beryl Colinas León, Dra.



Chapingo, Estado de México, noviembre del 2018

COMPORTAMIENTO POSCOSECHA DE FRUTOS DE CIRUELA MEXICANA
(*Spondias purpurea*) EN ATMÓSFERAS MODIFICADAS CON
MICROPERFORADO

Tesis realizada por **ADRIANA HERRERO GALINDO** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTORA: 
DRA. MARÍA TERESA B. COLINAS LEÓN

CODIRECTORA: 
DRA. MA. DEL ROSARIO GARCÍA MATEOS

ASESORA: 
DRA. MA. CARMEN YBARRA MONCADA

ASESOR: 
DR. IRAN ALIA TEJACAL

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1	Origen	4
2.2	Distribución	4
2.3	Taxonomía.....	5
2.3.1	Composición química.....	6
2.3.2	<i>Spondias mombin</i> L. (jobo, ciruela amarilla)	7
2.3.3	<i>Spondia purpurea</i> L. (jocote, jobo, abal, ciruela mexicana, red mombin)	7
2.3.4	<i>Spondias radlkoferi</i> L. (ciruela verde)	9
2.4	Fisiología de la maduración de frutos	10
2.4.1	Proceso de maduración del fruto	10
2.5	Índice de maduración.....	12
2.6	Frutos climatéricos y no climatéricos	12
2.6.1	Factores que afectan los frutos después de la cosecha	14
2.6.2	Manejo de la temperatura	14
2.6.3	Bajas temperaturas en los frutos	14
2.6.4	Diferencias y ventajas de las atmósferas controladas y modificadas (AC, AM)	15
2.6.5	Atmósferas controladas (AC) y modificadas (AM)	15
2.6.6	Características de una atmósfera modificada	16
2.6.7	Productos frescos en empaque en atmósferas modificadas (EMAM)	17
2.6.8	Generalidades del empaque en atmósferas modificadas en frutos frescos (EMAM).....	17

2.6.9	Factores que influyen en el empaque en atmósferas modificadas (EMAM)	18
2.6.10	Tasa respiratoria	18
2.6.11	Métodos para modificar la atmósfera modificada.....	19
2.6.12	La atmósfera de equilibrio.....	19
2.6.13	Limitaciones de los empaques en atmósfera modificada.....	20
2.6.14	Efectos negativos de la atmósfera modificada	20
2.6.15	Tipos de polímeros utilizados para empaque en atmósferas modificadas	21
2.7	Componentes antioxidantes	21
2.7.1	Compuestos fenólicos.....	21
2.7.2	Flavonoides.....	23
2.7.3	Carotenoides.....	23
2.8	Literatura citada	26
3	CALIDAD POSCOSECHA EN FRUTOS DE CIRUELA MEXICANA (<i>Spondias purpurea</i>) ALMACENADOS A 14 Y 25 °C CON MICROPERFORADO*	30
3.1	Introducción	32
3.2	Metodología	34
3.2.1	Sitio de recolecta	34
3.3	Evaluación de propiedades físico-químicas.....	35
3.3.1	Pérdida de peso.....	35
3.3.2	Firmeza	35
3.3.3	Sólidos solubles totales.....	35
3.3.4	pH	35
3.3.5	Acidez	35
3.3.6	Respiración y producción de etileno	36
3.4	Resultados y discusión	37
3.4.1	Pérdida de peso.....	37
3.4.2	Firmeza	40
3.4.3	Sólidos solubles totales (SST)	43

3.4.4	pH	45
3.4.5	Acidez	47
3.4.6	Respiración y producción de etileno	49
3.5	Conclusiones	52
3.6	Literatura citada	53
4	CONTENIDO DE COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN FRUTOS DE CIRUELA MEXICANA (<i>Spondias purpurea</i> L.) EN ATMÓSFERAS MODIFICADAS*	57
4.1	Introducción	59
4.2	Materiales y métodos	61
4.2.1	Material vegetal	61
4.2.2	Diseño experimental	61
4.2.3	Preparación de extractos	61
4.2.4	Determinación de compuestos fenólicos	62
4.2.5	Cuantificación de flavonoides	62
4.2.6	Carotenoides totales	62
4.2.7	Actividad antioxidante	64
4.2.8	Clorofilas totales	64
4.3	Resultados y discusión	65
4.3.1	Compuestos fenólicos	65
4.3.2	Flavonoides	67
4.3.3	Carotenoides en pulpa	69
4.3.4	Carotenoides en epicarpio	71
4.3.5	Actividad antioxidante	73
4.3.6	Clorofilas	76
4.4	Conclusiones	79
4.5	Literatura citada	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica	5
Cuadro 2. Composición química de frutos de <i>Spondias purpurea</i>	6
Cuadro 3. Condiciones edafoclimáticas de crecimiento de <i>Spondias purpurea</i> .	8
Cuadro 4. Diseño de tratamiento ensayados para evaluar el comportamiento poscosecha de ciruela mexicana	34
Cuadro 5. Contenido de compuestos antioxidantes al inicio y final del almacenamiento de frutos de ciruela mexicana almacenados en atmósferas modificadas con diferentes niveles de microperforado (0, 3, 6, 10) en dos temperaturas (T)	78
Cuadro 6. Correlación entre compuestos antioxidantes de frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución potencial actual para <i>Spondias</i> spp. a) <i>S. purpurea</i> y b) <i>S. mombin</i> . Fuente: Arce-Romero et al. (2016).....	5
Figura 2. Ciruela mexicana a) <i>S. mombin</i> , b) <i>S.purpurea</i> y c) <i>S. radlkoferi</i>	7
Figura 3. Fases del climaterio respiratorio en una fruta climatérica madura.	13
Figura 4. Proceso general de transferencia de calor en frutos frescos empacados en AM. *Fenómeno continuo dentro y alrededor del producto envasado.	17
Figura 5. Comportamiento de la pérdida de peso en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Pérdida de peso en frutos almacenados a 14°C , (b) Pérdida de peso en frutos almacenados a 25°C . Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.	38
Figura 6. Pérdida de peso al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14°C y 25°C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P\leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.	39
Figura 7. Comportamiento de la firmeza en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Firmeza de los frutos almacenados a 14°C , (b) Firmeza de los frutos almacenados a 25°C . Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6	

y 10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.....	41
Figura 8. Firmeza al octavo día de almacenamiento de frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas ($14\ ^\circ\text{C}$ y $25\ ^\circ\text{C}$). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y M0. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P\leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.	42
Figura 9. Comportamiento de sólidos solubles totales (SST) en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) SST de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b) SST de frutos almacenados a $25\ ^\circ\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.	43
Figura 10. Sólidos solubles totales (SST) al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas ($14\ ^\circ\text{C}$ y $25\ ^\circ\text{C}$). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P\leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.....	44
Figura 11. Comportamiento del pH en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) pH de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b) pH de frutos almacenados a $25\ ^\circ\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.	46
Figura 12. pH al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad	

($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas ($14\ ^\circ\text{C}$ y $25\ ^\circ\text{C}$). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P\leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media. 46

Figura 13. Comportamiento de la acidez en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Acidez de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b) Acidez de frutos almacenados a $25\ ^\circ\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones..... 47

Figura 14. Acidez titulable al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas ($14\ ^\circ\text{C}$ y $25\ ^\circ\text{C}$). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P\leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media. 49

Figura 15. Comportamiento de la producción de etileno en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Etileno de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b) Etileno de frutos almacenados a $25\ ^\circ\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones..... 50

Figura 16. Comportamiento de la velocidad de respiración en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Etileno de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b) Etileno de frutos almacenados a $25\ ^\circ\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque:

M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.....	50
Figura 17. Comportamiento de compuestos fenólicos en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Fenoles de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b) Fenoles de frutos almacenados a $25\ ^\circ\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.....	65
Figura 18. Fenoles totales al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas ($14\ ^\circ\text{C}$ y $25\ ^\circ\text{C}$). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.	66
Figura 19. Comportamiento de los flavonoides en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Flavonoides de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b) Flavonoides de frutos almacenados a $25\ ^\circ\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.	68
Figura 20. Flavonoides al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas ($14\ ^\circ\text{C}$ y $25\ ^\circ\text{C}$). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.	69
Figura 21. Comportamiento de los carotenoides en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Carotenoides de frutos almacenados a $14\ ^\circ\text{C}$, (b)	

Carotenoides de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones en el empaque: M0, M3, M6 y M10.....	70
Figura 22. Carotenoides totales en pulpa al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.....	70
Figura 23. Comportamiento de los carotenoides en epicarpio en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Carotenoides de frutos almacenados a 14 °C, (b) Carotenoides de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10.....	72
Figura 24. Carotenoides en el epicarpio al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.....	73
Figura 25. Comportamiento de la actividad antioxidante en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Actividad antioxidante de frutos almacenados a 14 °C, (b) Actividad antioxidante de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.	74
Figura 26. Actividad antioxidante al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062\ \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas	

a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa. 75

Figura 27. Comportamiento de las clorofilas en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Clorofilas de frutos almacenados a 14 °C, (b) Clorofilas de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. 76

Figura 28. Clorofilas totales al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa. 77

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada para la realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de aprender. Al Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, en especial a la Dra. Ma. Carmen Ybarra y al MC. Armando Santos. Departamento de Fitotecnia por las facilidades brindadas para realizar este trabajo.

A la Dra. María Teresa Colinas León, por su sabiduría y paciencia. Gracias por aceptar dirigir este trabajo.

A la Dra. Ma. Del Rosario García Mateos por su atención y dedicación, así como el tiempo que me brindó.

A la Dra. Ma. Carmen Ybarra por su tiempo dedicado para la revisión del trabajo, por la disponibilidad para explicar las cosas y sobre todo por su paciencia.

Al Dr. Irán Alia Tejacal por permitirme trabajar en el laboratorio que tiene a su cargo y por la asesoría brindada.

A Dra. Willelmira por contribuir a mi formación académica y por motivarme a continuar.

A Dios por cada instante de mi vida, por enseñarme a creer y confiar. Por mostrarme que aún existen grandes seres humanos, también por recordarme que antes de ser profesionista soy humano.

A mis padres y hermanos por enseñarme a querer ser diferente, por ayudarme a comprender que la vida cambia a cada instante que nada puede ser perfecto y que lo correcto no es lo que nos conviene, es ser responsable de nuestras acciones y decisiones, aunque nos duela, porque han sabido ser la familia que necesito.

A mis compañeras Caro, Prisma, Melbys y Angélica porque de sus virtudes aprendí y también de sus defectos. Gracias por hacer más agradable estos dos años.

A mis compañeros ministros que fueron una familia Héctor, Juan Pablo, Nico, Chepy, Jessy y Brayan por su bondad y sencillez, también por inspirarme el deseo al servicio de nuestros compañeros.

A mis compañeros de laboratorio Andrea, Flor y Arturo, gracias por su amistad y ayuda en esos momentos complicados, sin duda su compañía hizo más agradable mi estancia.

*Dios nos ha dado alas para volar alto, tan
alto como las águilas y descubrir que sus pensamientos al igual que sus
caminos, son más altos que los nuestros (Isaías 40:31)*

DATOS BIOGRÁFICOS

Adriana Herrero Galindo, nació el 07 de marzo de 1991 en san Cristóbal Xochimilpa, Puebla. Realizó sus estudios de educación media superior en el bachillerato general oficial “Baudelio Serafín Sosa” y posteriormente obtuvo su título de licenciada en Ingeniería Agroindustrial en la Universidad Interserrana del Estado de Puebla-Ahuacatlán.

RESUMEN GENERAL

COMPORTAMIENTO POSCOSECHA DE FRUTOS DE CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea*) EN ATMÓSFERAS MODIFICADAS CON MICROPERFORADO*

Las *Spondias* son plantas tropicales nativas de México, sus frutos son atractivos por su diversidad en la coloración, tamaño y sabor. Sin embargo, tienen una corta vida de anaquel. Existen alternativas que permiten alargar su vida como su calidad poscosecha como el uso de atmósferas modificadas con microperforado ($<200\mu\text{m}$). Se realizó la recolecta de frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea*) en madurez fisiológica en el estado de Morelos en octubre del 2017. El objetivo fue evaluar el comportamiento bajo dos temperaturas de almacenamiento en atmósferas modificadas, con diferentes niveles de microperforado. Se ensayaron dos niveles de temperatura (14 y 25 °C) y cuatro niveles de microperforado (0, 3, 6, 10), durante 14 días de almacenamiento. Se observó la disminución de firmeza del fruto, en todos los tratamientos almacenados a 25 °C, el valor más alto de firmeza fue observado en el tratamiento M0-T14 (4.96 N), la pérdida de peso más alta se registró en el tratamiento M10-T25 de 3.78 %. En SST el valor más alto se reportó en el tratamiento M3-T25 (24.73 °Brix). La velocidad de respiración fue alta en frutos almacenados a 25 °C y los de 14 °C bajos por el efecto de la temperatura. El contenido de compuestos antioxidantes varió durante el proceso de maduración. En compuestos fenólicos las concentraciones fueron más estables en el tratamiento M3-T14. La actividad antioxidante (7.02 mg ET 100 g⁻¹ p.f. valor más alto al final del almacenamiento) y flavonoides (6.65 mg EQ 100 g⁻¹ p.f.). La concentración de clorofilas se fue degradando durante el tiempo, por tanto, se observó un incremento de carotenoides, mostrando mayor concentración al final del almacenamiento (14.16 $\mu\text{g mL}^{-1}$ p.f.). La temperatura, el tiempo y el microperforado conservaron las características de calidad al alcanzar valores similares a los reportados en *Spondias* cosechados en madurez de consumo.

Palabras clave: Bajas temperaturas, atmósferas modificadas, poscosecha

* Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ing. Adriana Herrero Galindo
Director (a) de Tesis: Dra. Ma. Teresa Beryl Colinas León

GENERAL ABSTRACT

POST-HARVEST BEHAVIOR IN FRUITS OF MEXICAN PLUM (*Spondias purpurea*) IN MODIFIED MICROPERFORATED ATMOSPHERES*

Spondias are tropical plants native to Mexico, their fruits are attractive for their diversity in color, size and taste. Modified atmospheres alter the physiological process and lengthen the shelf life. On the other hand, microperforation (<200µm) decreases the risk of fermentation. The collection of Mexican plum fruits (*Spondias purpurea*) at physiological maturity in the state of Morelos was carried out in October 2017. The objective was to evaluate the behavior under two storage temperatures in modified atmospheres, with different levels of microperforation. Two temperature levels (25 and 14 °C) and four levels of microperforation (0, 3, 6, 10) were tested during 14 days of storage. The decrease in firmness was observed, in all treatments stored at 25 °C, the highest firmness value was in the M0-T14 treatment (4.96 N), the highest weight loss was recorded in the M10-T25 treatment of 3.78%. In SST the highest value was reported in the M3-T25 treatment (24.73 ° Brix). The content of antioxidant compounds fluctuated during the maturation process. In phenols the concentrations were more stable in the M3-T14 treatment. The antioxidant activity (7.02 mg ET 100 g⁻¹ f.w. highest value at the end of storage) was not related to the phenols since low values were observed, similar to the flavonoids (6.65 mg EQ 100 g⁻¹ f.w.). The concentration of chlorophylls was high on the first day of the evaluation, however they degraded over time due to maturation, therefore an increase in carotenoids was observed, showing higher concentration at the end of storage. Temperature, time and microperforation positively affected quality characteristics by reaching values similar to those reported in fruits harvested at consumption maturity.

Keywords: Low temperatures, modified atmospheres, postharvest

* Thesis: Universidad Autónoma Chapingo
Author: Ing. Adriana Herrero Galindo
Advisor: Dra. Ma. Teresa Beryl Colinas León

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La ciruela mexicana (*Spondias purpurea*) presenta diversos centros de domesticación, uno de ellos abarca desde el sur de México hasta Panamá y el otro en la parte centro occidente (Miller & Schaal, 2005). Pertenece a la familia Anacardiaceae y al género *Spondia*. Son frutales considerados nativos de México y se distribuyen en América tropical, Centroamérica hasta Perú y Brasil (Morton, 1987). Los frutos de *Spondias purpurea* son altamente perecederos; aunado al manejo inadecuado se generan pérdidas poscosecha por el escaso conocimiento de la fisiología de los frutos y tecnología adecuada para su almacenamiento, transporte y comercialización. *S. purpurea* es la especie más importante económicamente ya que se ha introducido al cultivo con fines comerciales. Por lo anterior, es necesario generar alternativas que ayuden a reducir las pérdidas poscosecha y permitan incrementar la vida de anaquel, de esta manera a los productores le será económicamente rentable producir este frutal.

Existen tecnologías poscosecha que se aplican a frutas y hortalizas, tienen como principal objetivo extender la vida de anaquel, así como conservar las características de calidad durante el tiempo de almacenamiento. Como la refrigeración que puede usarse para aumentar la vida útil de los productos frescos, combinado con el uso de atmósferas modificadas. El método más común para obtener atmósferas modificadas en el empaque de frutas frescas es el uso de películas plásticas. La película forma una barrera protectora entre el producto y la atmósfera circundante donde genera un cambio en las condiciones gaseosas del entorno inmediato del producto como consecuencia de su metabolismo (Romojaro et al., 1996). Las frutas y hortalizas una vez cosechadas siguen respirando porque utilizan sus reservas metabólicas acumuladas durante la fase de crecimiento y maduración Romojaro et al. (1996).

Maldonado-Astudillo et al. (2014) mencionan que las *Spondias* son frutos con una alta tasa de respiración ($20\text{-}40\text{ mg CO}_2\text{ kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) y muy alta producción de etileno ($>100\mu\text{L kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) considerando la clasificación de Kader (2007), siendo necesario reducir la tasa de respiración para retrasar la senescencia y lograr mayor vida de anaquel. Se han realizado trabajos enfocados a la caracterización física, química y morfológica de ciruela mexicana (Pérez-Arias et al., 2008); la aplicación de tecnologías poscosecha como la aplicación de 1-metilciclopropeno (1-mcp) como retardador del proceso de maduración (Osuna, Pérez, Vázquez & Gómez, 2011); Pérez-López, Saucedo-Veloz, Arévalo-Galarza y Muratalla-Lua (2004) evaluaron el comportamiento fisiológico y fisicoquímico de frutos cosechados en tres estados de maduración (verdes, 50 % y 75 % de coloración) almacenados a 8, 12 y 20 °C, donde encontraron que los frutos sufrieron daño por frío al ser expuestos a bajas temperaturas en periodos prolongados. En la evaluación de propiedades nutraceuticas Maldonado-Astudillo et al. (2014); Solórzano-Morán et al. (2015); Suárez-Vargas et al. (2017) cuantificaron el contenido de fenoles, flavonoides y actividad antioxidante, en las especies *Spondias purpurea* y *S. mombin* a temperatura ambiente y diferentes estados de maduración. Souza (2008) menciona que hay pocos estudios que examinen los efectos de las atmósferas modificadas en *Spondias*. También explica que la vida poscosecha del fruto va a depender de la etapa de cosecha madura o inmadura, además de la temperatura de almacenamiento.

Dada la diversidad de colores que caracterizan las variedades mexicanas, es importante determinar la composición y actividad de los compuestos antioxidantes presentes en los frutos de *S. purpurea*, ya que pueden constituir fuentes importantes de tales compuestos que permitan desarrollar el posicionamiento del fruto en el mercado en beneficio del productor primario.

Por ello, en la presente investigación se evaluó el comportamiento de las características de calidad y nutraceuticas en frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea*) ecotipo cuernavaqueña, almacenadas en refrigeración y a

temperatura ambiente, en bolsas plásticas con diferentes niveles de microperforado.

En la primera fase del trabajo se evaluó el comportamiento de las características de calidad como: firmeza, pérdida de peso, SST, acidez titulable y pH en frutos de ciruela mexicana en la especie *Spondias purpurea* ecotipo cuernavaqueña de la época húmeda (agosto-noviembre) almacenadas en atmósferas modificadas en dos temperaturas.

En la siguiente fase del experimento se determinó el contenido de compuestos antioxidantes, fenoles, flavonoides carotenoides, y actividad antioxidante en ciruela mexicana, con el objetivo de evaluar su efecto en el contenido de estos metabolitos con el uso de la refrigeración y atmósferas modificadas durante un periodo de tiempo.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen

La familia Anacardiaceae es considerada de importancia económica debido al contenido de taninos, resinas y frutos comestibles. Dentro de la familia se encuentran a las más representativas y comerciales como el mango, el marañón, pistache y la ciruela mexicana o jobos.

Cruz-León; Pita-Duque y Rodríguez-Haros (2012) mencionan que actualmente se cultivan seis especies: tres asiáticas (*S. bobonica*, *S. citerea* y *S. pinnata*) y tres americanas (*S. mombin*, *S. purpurea* y *S. tuberosa*).

Las tres especies que se encuentran de manera natural en Mesoamérica son: *S. mombin* L. var. *mombin*, *S. radlkoferi* y *S. purpurea*. *S. mombin* y *S. radlkoferi* son similares; son árboles grandes se encuentran en selvas altas perennifolias. Las inflorescencias son panículas colgantes grandes que sostienen numerosas flores pequeñas, color crema, blancas, amarillas o verdosas, primariamente hermafroditas y capaces de cruzarse. *S. mombin* se distingue de *S. radlkoferi* por sus frutos; para *S. mombin* son esferas amarillo-anaranjadas, mientras que los de *radlkoferi* son más oblongos y verdes al madurar (Cruz et al., 2012).

2.2 Distribución

En México la producción de estos frutos se distribuye a lo largo de la costa occidental de Sonora a Chiapas, y al sur del país en Yucatán y Quintana Roo (Miller & Schaal, 2005). La presencia de *Spondia purpurea* se encontró fuertemente relacionada con el tipo de clima y su distribución resultó predominante en la vertiente del océano pacífico (Figura 1), en el centro de

Veracruz y la península de Yucatán (Arce-Romero, Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz 2016). La especie *Spondia mombin* registra mayor presencia en las zonas húmedas de Veracruz, Tabasco y Chiapas.

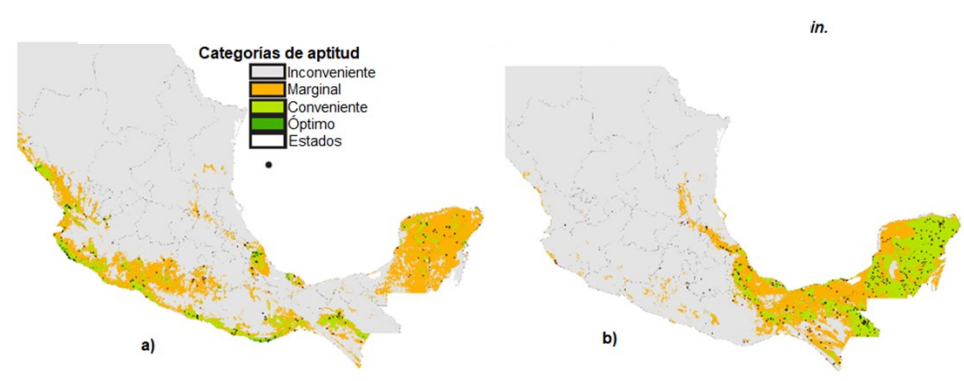


Figura 1. Distribución potencial actual para *Spondias* spp. a) *S. purpurea* y b) *S. mombin*. Fuente: Arce-Romero et al. (2016).

2.3 Taxonomía

Cuadro 1. Clasificación taxonómica

Reino	Plantae
División	Anthophyta
Clase	Dicotyledonae
Orden	Sapindales
Familia	Anacardiaceae
Género	<i>Spondias</i>
Especie	<i>Spp.</i>

2.3.1 Composición química

La composición química de los frutos de *Spondias* varía dependiendo de la especie, genotipo y estado de maduración, así como las condiciones geográficas, climáticas y estacionales en donde se desarrollen (Adepoju, 2009).

Cuadro 2. Composición química de frutos de *Spondias purpurea*

Componente	<i>S. purpurea</i>
Contenido energético (kcal 100g ⁻¹)	74
Humedad (g 100g ⁻¹)	77.6
Carbohidratos (g 100g ⁻¹)	19.1
Lípidos (g 100g ⁻¹)	0.2
Proteínas (g 100g ⁻¹)	0.7-0.9
Vitaminas (mg 100g ⁻¹)	
Ácido ascórbico (C)	45-49
Minerales (mg 100g ⁻¹)	
K	248-250
P	42-49

A continuación, se describen tres de las especies que se encuentran en México



Figura 2. Ciruela mexicana a) *S. mombin*, b) *S. purpurea* y c) *S. radlkoferi*.

2.3.2 *Spondias mombin* L. (jobo, ciruela amarilla)

Esta es una especie poco cultivada por lo que crece de forma silvestre en toda América tropical. El árbol mide de 40 a 80 cm de diámetro y alcanza hasta los 30 m de altura, sus hojas son compuestas e imparipinnadas, alternas y dispuestas en espiral, las flores se presentan en racimos terminales de hasta 60 cm de longitud, pequeñas y unisexuales. Los frutos son elipsoidales a ovoides, de 2.5 a 3 cm de longitud, amarillo brillante y contienen una pulpa de 3 a 4 mm de espesor. La pulpa del fruto es amarilla y ácida con un endocarpo grande y duro. Son frutos comestibles de sabor agridulce. Esta especie se encuentra distribuida de México a la Amazonía, hasta el Centro- Este de Brasil y Bolivia y la altitud que le favorece son los 700 m, factores como precipitación elevada y constante, aunque también le favorece la estación seca. Es una especie de tendencia eliófita, de crecimiento rápido, sin ningún problema crece en suelos arcillosos o limosos, usualmente fértiles, bien drenados, con pedregosidad baja o media (Cruz-León et al., 2012)

2.3.3 *Spondia purpurea* L. (jocote, jobo, abal, ciruela mexicana, red mombin)

Esta especie es la más común en México debido a que es cultivada. Algunas de sus características comprende árboles y arbustos muy ramificados, de 4 a 10 o

12 m de altura, sus hojas son en espiral imparipinadas de 10 a 20 cm de longitud. El fruto es una drupa elipsoidal de 2 a 5 cm de longitud y de 2 a 4 cm de ancho, liso brillante, de color rojo vino, purpúreo o diferentes tonalidades de amarillo en estado maduro. Con epicarpio firme, mesocarpio carnoso, de color amarillo y con 5 a 7 mm de grosor, de sabor acidulado muy agradable.

El número de frutos por árbol oscila de 25 a 700, según el tamaño, edad y vigor de la planta (Ramírez-Hernández, 2004). Esta especie fructifica en regiones donde los climas son cálidos y subhúmedos tendiendo a semisecos (León-Cruz et al., 2012) (Cuadro 3), como lo son desde la costa de Sonora hasta Chiapas y la Cuenca del Balsas, en el Pacífico; así como la Depresión Central de Chiapas, norte de Yucatán y Quintana Roo, hasta Veracruz, por el Caribe y el Golfo de México. Por lo general se desarrolla en terrenos de ladera, pedregosos, con suelos someros arenosos o arcillosos, con buen drenaje superficial (Ramírez-Hernández, 2004). Aunque Mortón (1987); Cuevas (1992) mencionan que puede proliferar en suelos de difícil drenaje, por lo que es considerada una especie robusta con alta resistencia a sequía.

Cuadro 3. Condiciones edafoclimáticas de crecimiento de *Spondias purpurea*

Origen	Sur de México y Centroamérica
Elevación (msnm)	0-2000
Temp. media anual (°C)	20-29
Clima	Tropical, seco y húmedo
Suelo	Profundos o delgados, drenados, arenosos, pedregosos, arcillosos, calcáreos, alcalinos y ácidos

Maldonado-Astudillo (2013).

Se agrupan dos tipos de las variantes cultivadas en México debido a su gran diversidad:

a) Ciruelas de estación seca que fructifican de febrero a mayo, las cuales se caracterizan por frutos pequeños redondos a elipsoidales, anaranjados o rojos intenso, de 2.5 a 4 cm de longitud, con epicarpio amarillo, mesocarpio blando succulento y dulce o ligeramente ácido y las altitudes a las que crece son de 0 a 1200 m (Cruz-León et al., 2012).

b) Ciruelas de estación húmeda estas fructifican de septiembre a diciembre. Los frutos se caracterizan por ser más grandes que los de estación seca, son de color amarillo a rojo intenso; epicarpio liso y brillante. La altitud a la que crece este fruto oscila entre los 800 y 2000 m (Cruz-León et al., 2012).

2.3.4 *Spondias radlkoferi* L. (ciruela verde)

Esta especie es muy fácil de reconocer pues cuando el fruto ya ha madurado no cambia de color, sino que conserva el epicarpio verde. Por ello, tiene como nombre común ciruela verde. Algunas características fenológicas descritas por Cruz-León et al. (2012) son: la altura del árbol puede alcanzar los 30 m, sus flores están agrupadas en racimos terminales, blancas o blanco-verdosas, muy pequeñas de 2.3 a 4.3 mm.

Se encuentra distribuida en el continente americano: en el sur de México, Centroamérica y norte de Sudamérica. En México se encuentra en los estados de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Campeche en selvas medianas subperennifolias, así como en las selvas altas, vegetación inundable y las condiciones de crecimiento son: altitud de 0 a 700 m; clima cálido-húmedo; temperatura media anual de 22 a 26 °C; precipitación anual superior a los 2000 mm; suelos negro pantanosos (Cruz-León et al., 2012).

2.4 Fisiología de la maduración de frutos

2.4.1 Proceso de maduración del fruto

La maduración es la fase final del crecimiento y desarrollo del fruto, proceso en el que se dan una serie de cambios, que conducen a la senescencia y abscisión. Generalmente se caracteriza por un incremento de la respiración y por la autocatálisis de la producción de etileno, aunque otras especies maduran sin mostrar ninguna de estas características (Azcon & Talón 1996).

Los cambios más significativos durante el proceso de maduración son el color, sabor, olor, textura. Estos cambios son el resultado de una reestructuración metabólica y química que se realiza dentro del fruto (García-Taín, García-Pereira, Hernández-Gómez & Pérez-Padrón, 2011).

En la mayoría de los frutos la interacción entre azúcares reductores y no reductores y los ácidos orgánicos determinan las características del sabor. Lo amargo del fruto está asociado con la astringencia de los compuestos fenólicos de los frutos inmaduros y con la presencia de alcaloides glicosilados, limonoides, y cucurbitinas. La mayoría de los frutos acumulan almidón durante su desarrollo, que origina azúcares más sencillos antes o durante la maduración por la acción de enzimas (Azcón & Talón, 1996).

Compuestos volátiles: Los compuestos volátiles complementan los componentes del sabor de los frutos. Se han identificado ácidos, alcoholes, aldehídos, cetonas, éteres, ésteres, acetales, hidrocarburos, fenoles, lactonas, compuestos de azufre, aminas y diferentes moléculas heterocíclicas. La concentración total de estos compuestos varía entre los distintos frutos (Azcón & Talón, 1996).

Ácidos orgánicos: Los ácidos orgánicos descienden durante la maduración del fruto como consecuencia de su dilución, provocada por la acumulación de agua, y de su metabolismo (respiración). Los ácidos orgánicos más frecuentes en frutos climatéricos son el ácido cítrico y málico (Azcon & Talón, 2008). La mayoría de

los frutos contienen elevadas concentraciones de ácidos relacionados con el ciclo de ácidos tricarboxílicos y otros ciclos metabólicos, con diferentes proporciones relativas, cuyo exceso se acumula en la vacuola.

Textura: El ablandamiento de los frutos es uno de los últimos procesos del desarrollo, ocurre una vez que han finalizado los cambios en la composición. El consumo de frutos inmaduros produce una impresión de insipidez, no sólo porque no se ha producido la acumulación necesaria de azúcares solubles y compuestos aromáticos, sino que se dificulta la ruptura y liberación de los componentes vacuolares (Azcón & Talón, 1996).

Pared celular: Además de los cambios en la composición, color y fisiología de los frutos durante la maduración, también se producirán alteraciones en la textura. El ablandamiento de los frutos se puede atribuir a la pérdida de turgencia de las células que sigue a la erosión de las paredes y al descenso del contenido de azúcares neutros (Gross & Sams, 1984).

La degradación de las pectinas y otros polisacáridos da por resultado el ablandamiento de las frutas, en tanto que los cambios en los ácidos orgánicos, proteínas, aminoácidos y lípidos pueden influir en la calidad del sabor del fruto (Kader, 1994)

Sabor: Es la producción de una mezcla compleja de compuestos volátiles que interaccionan con la producción de otros constituyentes mayoritarios, especialmente carbohidratos, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos. El aroma es característico de cada especie y variedad (Romojaro et al., 1996).

Apariencia: La maduración suele coincidir con un cambio de color en la epidermis incluyen los atributos que se detectan visualmente como son el color, el tamaño y forma (Azcon & Talón 2008).

Senescencia: Es una serie de transformaciones programadas que siguen a la maduración del fruto y originan cambios degradativos en los tejidos que rodean a las semillas que pueden finalizar en la abscisión del fruto (Azcon & Talón, 2008).

Los cambios en la pigmentación que se observan en los productos hortofrutícolas ya sea antes o después de la cosecha son deseables para la mayoría de las frutas pero no para las hortalizas, este cambio se debe a la pérdida de la clorofila deseable en frutos, pero no en hortalizas; da como resultado el desarrollo carotenoides y antocianinas principalmente en frutos. (Azcon & Talón, 1996)

Los compuestos nutricionales se ven afectados durante el proceso de maduración y desarrollo de los frutos. Así los cambios en los carbohidratos incluyen la conversión de almidón a azúcar o bien la conversión de azúcar a almidón (Kader, 1994).

2.5 Índice de maduración

Los índices de madurez indican, por cambios perceptibles, que el fruto ha llegado a la madurez fisiológica que le permitirá alcanzar la madurez de consumo una vez que se separe de la planta. También se utilizan madurez de cosecha o madurez comercial que es la etapa fisiológica en el desarrollo del fruto en que se puede desprender de la planta y alcanzar a desarrollar madurez de consumo (Almaza & Espinoza, 1995). La madurez fisiológica sazón es considerada como aquel estado en el cual el producto ha alcanzado un desarrollo suficiente para que, después de la cosecha y manejo poscosecha, su calidad sea la mínima aceptable para el consumidor final (Kader, 2002). En ciruela mexicana el índice de cosecha es el color y este va a depender de la especie o variedad que produzcan.

Algunos índices de madurez que se utilizan para la cosecha de los frutos son: días de floración o cosecha, tamaño, forma, textura, color externo e interno, parámetros composicionales, materia seca, contenido de almidón, contenido de azúcar, contenido de taninos, contenido de acidez, y etileno interno (Reid, 2007).

2.6 Frutos climatéricos y no climatéricos

Los frutos pueden dividirse en climatéricos y no climatéricos. En frutos climatéricos, la tasa de respiración aumenta y se observa el pico climatérico,

posteriormente disminuye. Los frutos climatéricos generalmente coinciden con los cambios asociados con la maduración, como los cambios de color, el ablandamiento, incremento en la permeabilidad del tejido y el desarrollo de aromas (Saltveit, 1999).

Kader (1994) menciona que un fruto climatérico es aquel que muestra un incremento en la velocidad de producción de CO_2 y C_2H_4 que coincide con la maduración de consumo, mientras que en el mismo periodo los no climatéricos no muestran cambios en sus velocidades de producción de CO_2 y C_2H_4 .

En las especies climatéricas, el etileno tiene la capacidad de estimular la maduración. Para frutos climatéricos el aumento de la tasa de respiración durante la maduración da como resultado un consumo mayor de O_2 y producción de CO_2 . En especies con un comportamiento no climatérico, el aumento en la respiración sólo se produce en presencia de etileno y su producción endógena no se modifica, permaneciendo siempre en niveles reducidos (Saltveit, 1999).

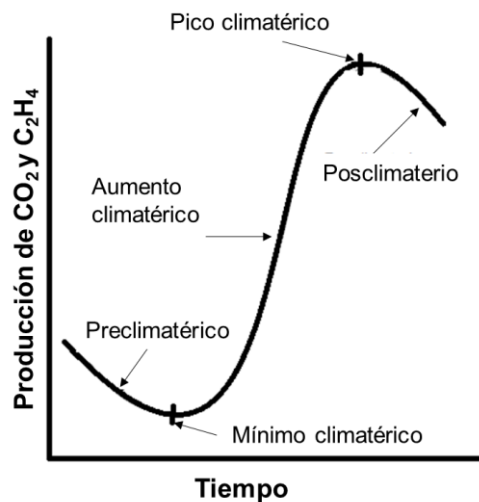


Figura 3. Fases del climaterio respiratorio en una fruta climatérica madura.
Fuente: Yahia (2011).

2.6.1 Factores que afectan los frutos después de la cosecha

La velocidad de transpiración afecta los frutos durante el almacenamiento. Tal variable está influenciada por dos factores: el primero que es interno o del producto, comprende las características anatómicas o morfológicas. El segundo implica los factores externos o ambientales que incluyen la temperatura, la humedad relativa, movimiento del aire y presión atmosférica (Kader, 2002)

La transpiración está definida como un proceso físico que puede ser controlado aplicando tratamientos como pueden ser ceras y otros recubrimientos superficiales, o bien envolturas con películas plásticas (Kader, 2002)

2.6.2 Manejo de la temperatura

El almacenamiento refrigerado es un proceso muy importante que puede que puede usarse para aumentar la vida útil de los productos frescos. Inestroza et al. (2016) consideran esencial las bajas temperaturas para reducir aquella del producto y el tiempo en el cual se alcanza la temperatura óptima de almacenamiento, pues son los factores que más influyen en la disminución de estos procesos.

Así también Aghdam y Bodbodak (2014), indican que el almacenamiento a baja temperatura ha sido y continua siendo la técnica poscosecha más eficiente para mantener la calidad de las frutas y hortalizas y extender su periodo de comercialización.

2.6.3 Bajas temperaturas en los frutos

Existen diferentes tecnologías disponibles para conservar productos hortofrutícolas, sin embargo, solo son complementos ya que no pueden sustituir a la refrigeración (Flores & Yahia, 2001). El empaque en atmósferas modificadas (EMAM) es una técnica que se usa mayormente para generar una atmósfera modificada (AM) alrededor de un producto empacado en diferentes tipos de polímeros que a su vez permiten un intercambio de gases. La necesidad de la

aplicación de bajas temperaturas o de refrigeración en combinación con el uso del empaque en atmósferas modificadas (EMAM) es de gran relevancia (Flores & Yahia, 2001).

2.6.4 Diferencias y ventajas de las atmósferas controladas y modificadas (AC, AM)

La atmósfera controlada (AC) y la atmósfera modificada (AM) se refieren a la manipulación deliberada de la composición del ambiente gaseoso para que sea óptima para el almacenamiento del producto. Los constituyentes de las AC son más precisos y estables, mientras que la composición del aire de las AM cambia continuamente (Beckles, 2012). Tanto en AC como en AM, el dióxido de carbono aumenta y el oxígeno disminuye. La efectividad del enfoque depende de la variedad, la madurez y la calidad inicial de la fruta, la temperatura del almacenamiento y la composición y duración de la exposición a AM o AC (Beckles, 2012).

Algunas de las ventajas del uso de las AM y AC para el manejo de los frutos son: a) retardo de la maduración y senescencia; b) el alivio y/o control de algunos desórdenes fisiológicos como es el daño por frío; c) el control de algunas enfermedades y el control de insectos. Estas ventajas tienen como beneficio la reducción de la pérdida cuantitativa y cualitativa del alimento y prolongar la vida de anaquel; d) mantienen la calidad nutritiva de las frutas y hortalizas (Yahia, 1995).

2.6.5 Atmósferas controladas (AC) y modificadas (AM)

Diversas tecnologías se han desarrollado con la finalidad de incrementar la vida poscosecha de las frutas y hortalizas, una de las técnicas que se ha implementado es el uso de gases inyectados en ciertos porcentajes como lo son las atmósferas controladas, definida por Yahia (1995) como aquellas atmósferas estrictamente controladas durante todo el periodo de almacenamiento, empaque o transporte; o bien el uso las atmósferas modificadas la cual consiste

únicamente en someter a los frutos en un recipiente o bolsa de plástico ya sea de baja o alta densidad con un contenido gaseoso diferente al del aire normal 20 a 21% de O₂, 0,03% de CO₂, 78-79% de N₂ y trazas de otros gases.

Fonseca, Oliveira, Lino, Brecht, y Chau, (2000) indican que el empaque con atmósferas modificadas es una modificación de la atmósfera que se basa en la interacción entre el proceso natural de producción de la respiración y el intercambio de gases a través del empaque. Debido a la respiración, hay una acumulación de dióxido de carbono (CO₂) y agotamiento del oxígeno (O₂) que está regulado por el intercambio de gases a través del empaque para que en el equilibrio, se alcancen concentraciones adecuadas de CO₂ y O₂.

Para el diseño de atmósferas modificadas, es importante comprender los cambios en la frecuencia respiratoria que luego disminuirá a medida que la fruta experimente senescencia (Fonseca, Oliveira, & Brecht, 2002).

2.6.6 Características de una atmósfera modificada

El empaque en AM se basa en el cambio de la composición del gas circundante mediante la interacción entre la permeabilidad de la película a los gases (O₂ y CO₂) y la tasa de respiración dentro del producto (Sousa-Gallagher, Mahajan, & Mezdad, 2013). Los frutos frescos cosechados son susceptibles a un mayor deterioro de la calidad y estrés fisiológico, debido a la aceleración de la tasa de respiración y la transpiración (Aindongo, Caleb, Mahajan, Manley & Opara, 2014). Kader (1989) mencionó que la permeabilidad del empaque, permite la modificación de las concentraciones en su interior, bajando el O₂ e incrementando el CO₂ y la humedad relativa para regular el metabolismo y prolongar la vida de la fruta. Caner, Aday y Demir (2008) mencionan que la clave para una AM exitosa en frutos frescos es usar un empaque de permeabilidad intermedia.

2.6.7 Productos frescos en empaque en atmósferas modificadas (EMAM)

En un sistema de EMAM, existe una interacción dinámica entre el metabolismo del producto (consumo de O_2 y generación de CO_2) y la transferencia de gases a través del empaque (entrada de O_2 y salida de CO_2) (Figura 4) un envasado en atmósfera modificada, con niveles adecuados de gases para aumentar la vida de almacenamiento del producto (Mistriotis, Briassoulis, Giannoulis, & D'Aquino, 2016). La tasa de transferencia de calor depende de las condiciones del flujo de aire, y se esperan variaciones en los coeficientes de transferencia de calor a lo largo de la superficie; estas variaciones producen diferencias en la temperatura del empaque (Pham, Trujillo, & McPhail, 2009).

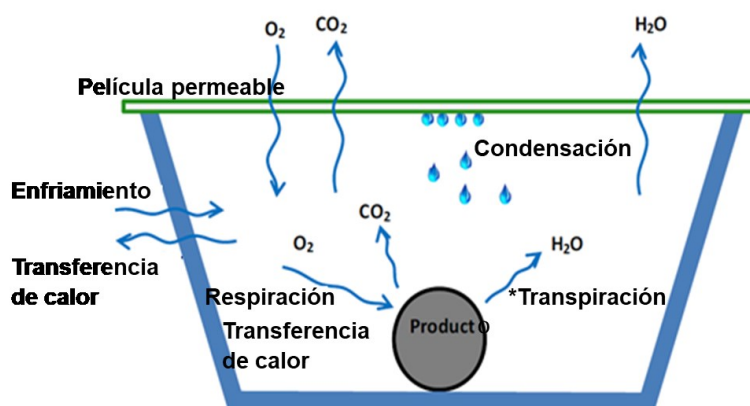


Figura 4. Proceso general de transferencia de calor en frutos frescos empacados en AM. *Fenómeno continuo dentro y alrededor del producto envasado.
Fuente: Belay, Caleb, & Linus, (2016).

2.6.8 Generalidades del empaque en atmósferas modificadas en frutos frescos (EMAM)

Los bajos niveles de O_2 y los altos niveles de CO_2 en EMAM pueden reducir potencialmente la tasa de respiración, la sensibilidad y producción de etileno, la descomposición y los cambios fisiológicos, concretamente la oxidación, con el beneficio resultante de prolongar la vida de almacenamiento de los productos frescos (Fonseca et al., 2000). Para obtener un sistema de EMAM satisfactorio,

es necesario conocer el tipo de producto a empacar, el peso, las tasas de respiración y transpiración, también es necesario conocer la permeación del empaque que se va a utilizar (Castellanos, Polanía, & Herrera, 2016). Cada producto tiene una reacción específica a un empaque en particular, y por lo tanto, es necesario encontrar las concentraciones de gas y la temperatura más apropiadas que extienda su vida de anaquel (Castellanos, Polanía, & Herrera, 2016).

2.6.9 Factores que influyen en el empaque en atmósferas modificadas (EMAM)

Selcuk y Erkan (2015) explican que la efectividad de EMAM en un producto envasado está relacionada con el cambio en sus propiedades de calidad, considerando que están influenciadas con las condiciones de almacenamiento, como la temperatura y las concentraciones de gas en el espacio de cabeza del empaque. Así también, Banda, Caleb, Jacobs, y Opara, (2015) mencionan que el EMAM, la maduración y el deterioro se verán afectados y, si el sistema es adecuado, estos procesos se retrasarán ya que la actividad de la enzima se reduce debido a una disminución de la temperatura y O_2 , y un aumento en la concentración del CO_2 en el espacio de cabeza que rodea al fruto.

Esto da como resultado una reducción de la actividad metabólica, una disminución de la degradación de los ácidos orgánicos, carbohidratos, clorofilas, pigmentos, compuestos volátiles, pérdida de humedad y la producción de azúcares, por ende la evolución de las propiedades fisicoquímicas y de calidad como el color, la firmeza, el peso, la acidez y los SST (Gwanpua et al., 2012).

2.6.10 Tasa respiratoria

La disminución de la intensidad respiratoria de los productos sometidos a AM es proporcional a la concentración de oxígeno, aunque es necesario que ésta no sea inferior a 3 %, pues de lo contrario se iniciará el metabolismo anaerobio, con descarboxilación de ácido pirúvico a acetaldehído y CO_2 y finalmente formación

de etanol. Este nivel crítico de O_2 depende esencialmente de la especie, variedad, temperatura y tiempo de conservación (Romojaro et al., 1996).

2.6.11 Métodos para modificar la atmósfera modificada

- 1) La pasiva es la más simple: y consiste en empaquetar la fruta y dejar que la respiración modifique la atmósfera hasta niveles de equilibrio en el intercambio con el aire externo a través del material, el empaque al vacío en bolsas de baja permeabilidad al O_2 rápidamente baja su concentración hasta 1 % (Gil, 2012).
- 2) En segundo lugar encontramos a la mezcla de gases inyectada, lo que se hace es reemplazar el aire, activo, determina, de partida, la atmósfera deseada, la cual es mantenida por la respiración y la permeabilidad del material (Gil, 2012).

2.6.12 La atmósfera de equilibrio

Después de un periodo inicial de adaptación a las nuevas condiciones atmosféricas se establece un equilibrio dinámico entre los gases producidos endógenamente en los distintos centros de acción enzimática de la célula y los gases del medio ambiente que rodea el fruto. En este equilibrio, el porcentaje de consumo de O_2 y el desprendimiento de CO_2 equivalen al porcentaje de salida de estos gases a través del embalaje a una temperatura determinada (Romojaro et al., 1996).

La intensidad respiratoria del producto, características de permeabilidad de la película, temperatura y humedad relativa determinan las condiciones de equilibrio de O_2 y CO_2 dentro del embalaje. Estos parámetros controlan el acondicionamiento del vegetal creando un equilibrio de gases en el interior del embalaje sobre el que no se puede intervenir a diferencia de la atmósfera controlada donde se ejerce un control sobre el sistema para regular la atmósfera (Romojaro et al., 1996).

2.6.13 Limitaciones de los empaques en atmósfera modificada

Joles, Cameron, Shirazi, Petracek y Beaudry (1994) mencionan que las películas poliméricas se usan ampliamente en EMAM. Sin embargo, tiene limitaciones por su estructura y características de permeación: 1) no son suficientemente fuertes para paquetes grandes, 2) las características de permeabilidad cambian de manera impredecibles cuando son estiradas o perforadas, 3) son buenas barreras contra el vapor de agua, pero causan condensación dentro del empaque cuando se producen fluctuaciones de temperatura y por consiguiente, aumentan la susceptibilidad al crecimiento microbiano, 4) la permeabilidad de la película puede verse afectada por la condensación del agua, 5) la uniformidad de la película es demasiado baja para productos de alta respiración, y 6) los productos que requieren altas concentraciones de CO_2 y O_2 pueden estar expuestos a la anaerobiosis debido a la alta relación de los coeficientes de permeabilidad CO_2 a O_2 .

2.6.14 Efectos negativos de la atmósfera modificada

La exposición de frutas y hortalizas frescas a niveles de O_2 y CO_2 fuera de los límites de tolerancia de cada vegetal puede inducir, además de la desviación hacia la ruta metabólica anaeróbica, otros desórdenes fisiológicos relacionados con maduraciones anormales en frutos climatéricos, pardeamientos internos y manchas o moteados marrón en la epidermis (Flores y Yahia, 2001). Otro factor que afecta es la humedad relativa cuyo exceso en el interior del envase debido a la respiración del producto y la mayor o menor permeabilidad de la película al vapor de agua, puede favorecer el desarrollo de ciertos agentes patógenos, debido a la acumulación de agua formada por condensación sobre la superficie interna de la película y del fruto (Flores & Yahia, 2001).

2.6.15 Tipos de polímeros utilizados para empaque en atmósferas modificas

Los polímeros y películas utilizadas para EMAM típicamente permiten la difusión libre de gases, lo mantiene un equilibrio entre la composición del gas de la atmósfera externa y la del interior del empaque debido a la respiración del tejido. Los materiales más comúnmente usados son: el polietileno (PE) de baja densidad, polietileno de teraftalato (PET), polipropileno (PP), el polivinilo de cloruro (PVC) y el poliestireno (Phillips, 1996).

2.7 Componentes antioxidantes

Los compuestos antioxidantes comprenden un diverso grupo de moléculas clasificadas como metabolitos secundarios en plantas. Se pueden clasificar en compuestos solubles en agua (ácidos fenólicos, quinonas, flavonoides) y compuestos insolubles en agua (taninos condensados, ligninas) (Risipail et al., 2005). Estos compuestos tienen relevancia en la calidad de los alimentos derivados de plantas. Son relevantes para la apariencia, el sabor y el sabor de los productos alimenticios, así como por sus propiedades que promueven la salud (Barberán & Espín, 2001).

2.7.1 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos comprenden un grupo diverso de moléculas clasificadas como metabolitos secundarios en plantas que tienen una amplia gama de estructuras y funciones. Son clasificados en compuestos solubles en agua (ácidos fenólicos, fenilpropanoides, flavonoides y quinonas) y compuestos insolubles en agua (taninos condensados, ligninas y ácidos hidroxicinámicos unidos a la pared celular) (Risipail et al., 2005). Los compuestos fenólicos se han considerados como un grupo importante por su numerosa presencia en el reino vegetal. Estas sustancias son sintetizadas durante el desarrollo normal de la planta en respuesta a situaciones diferentes, como el estrés y la radiación UV, entre otras (Naczek & Shahid, 2004).

Los compuestos fenólicos tienen un anillo aromático que contiene uno o más grupos hidroxilo y su estructura puede variar desde una molécula fenólica simple hasta la de un polímero complejo de alto peso molecular (Balasundram, Sundram, & Samman, 2006). Son clasificados principalmente de acuerdo al número de anillos de fenoles que contienen (ácidos fenólicos, estilbenos, flavonoides, ligninas y taninos). Todas estas sustancias tienen uno o más grupos hidroxilo directamente relacionado con un anillo aromático que caracteriza la estructura fenólica (Vermerris & Nicholson, 2006).

Los antioxidantes presentes en frutas, tal como ácidos fenólicos, flavonoides, antocianinas y taninos, entre otros, frecuentemente han sido asociados con beneficios para la salud (Fu et al., 2011). Un considerable número de estudios describen la presencia de diferentes tipos de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes en frutos. Estos compuestos antioxidantes donan un electrón al radical libre y la convierten en una molécula inofensiva (Haminiuk, Maciel, Plata-Oviedo, & Peralta, 2012). Las frutas contienen mezclas complejas de polifenoles que no se distribuyen uniformemente a través de la cáscara, la pulpa y las semillas (Williamson & Manach, 2005). Por lo que, no son absorbidos con la misma eficiencia. Son varios los factores que interfieren en la liberación y/o absorción de los polifenoles en las frutas. Algunos de ellos se mencionan a continuación:

- La estructura química de los polifenoles y su interacción con diferentes macromoléculas como proteínas y la fibra dietética afectan su asimilación y destino metabólico in vivo (Aguilera, 2007).
- El procesamiento de la fruta afecta los contenidos de polifenoles y altera la microestructura de la fruta, lo que ocasiona la pérdida o el enriquecimiento de algunos polifenoles e influye en su acceso o disponibilidad (Williamson & Manach, 2005).
- La interacción biológica entre polifenoles y células, enzimas y proteínas del sistema gastrointestinal juegan un papel esencial en su biodisponibilidad (Haminiuk et al., 2012).

2.7.2 Flavonoides

Los flavonoides son los principales compuestos bioactivos encontrados en las frutas y son distribuidos en seis subclases: flavonoles, flavononas, isoflavonas, flavan-3-ols, flavonas, y antocianinas (Robbins, 2003). Así mismo, están presentes como glucósidos, y en parte como ésteres, en lugar de compuestos libres. En el caso del grupo de los flavonoides, cuando están unidos a una o más moléculas de azúcar son conocidos como glucósidos de flavonoides y cuando no están conectadas a una molécula de azúcar se les llama agliconas (Williamson & Manach, 2005). El grado de glicosilación afecta directamente la capacidad antioxidante de los flavonoides. Generalmente, las formas de aglicona (miricetina y quercetina) son más activas que la forma de glucósido (Hopia & Heinonen, 1999; Kaur & Kapoor, 2001).

2.7.3 Carotenoides

Los carotenoides son responsables de los colores amarillo naranja y rojo en varios frutos y vegetales (Namita & Negi, 2010). Los carotenoides pueden ser clasificados en dos grupos de acuerdo a su función: xantofilas, que contienen oxígeno como grupo funcional, que incluye luteína y zeaxantina, y los carotenos que contienen solo una cadena hidrocarbonada primaria sin ningún grupo funcional, como el caroteno y licopeno. La adición de grupos polares (epoxi, hidroxilo y ceto) altera la polaridad de los carotenoides y afecta las funciones biológicas (Britton, 2008). Las frutas y los vegetales son la principal fuente de carotenoides y juegan un papel importante en la dieta debido a la actividad de la vitamina A (Haskell, 2013). El licopeno es el poderoso antioxidante de los carotenoides.

Los carotenoides se pueden encontrar en hojas y frutos verdes junto con la clorofila, también en muchas partes de la planta como flores rojas, amarillas y naranjas en raíces y semillas. En la naturaleza, la mayoría de los carotenoides existen en isómeros *trans* más estables en comparación con las formas de isómeros *cis* (Saini, Nile, & Park, 2015).

Las funciones y propiedades naturales de los carotenoides están determinadas por la estructura molecular. El cromóforo de polieno conjugado presente en la molécula de carotenoides determina la absorción de luz. Por lo tanto, el cromóforo es la parte de una molécula de carotenoide responsable de su color y acciones fotoprotectoras. El color surge cuando un cromóforo absorbe determinadas longitudes de onda de luz visible (Saini et al., 2015).

El tipo de carotenoides y la disponibilidad en frutas y verduras se pueden predecir por su color, como las frutas y vegetales amarillo-anaranjados son por lo general ricos en β -caroteno. La α -criptoxantina y zeaxantina se pueden encontrar en frutas de color naranja, como la mandarina, naranja y papaya. Del mismo modo, el licopeno es el responsable del color rojo brillante, es el principal componente de los tomates. La luteína (casi 45 %), un β -caroteno (25-30 %) seguida de violaxantina (10-15 %), y la neoxantina (10-15 %) son formas predominantes en las verduras de hoja verde (Laksshminarayana, Raju, Krishnakantha & Baskaran, 2005; Priyadarshani & Jans, 2014).

El contenido y tipo de carotenoides en plantas depende de varios factores pre y poscosecha, genotipo, tiempo de maduración, método de cultivo y condiciones climáticas. Diferentes partes de la misma planta pueden contener diferentes tipos y cantidades de carotenoides. Un ejemplo de ello, es la cáscara de las frutas, generalmente es más rica en carotenoides en comparación con la pulpa. Uno de los factores que puede afectar la cantidad son los tratamiento térmicos y no térmicos, el procesamiento puede degradar significativamente el nivel de carotenoides en los alimentos procesados (Moura & Miloff Boy, 2015).

El incremento del área superficial de productos secos o en polvo, conduce a mayores pérdidas, a menos que los productos estén protegidos de altas temperaturas, aire, y luz. Además de esto, el procesamiento térmico puede causar cambios cuantitativos significativos en los isómeros de los carotenoides, debido a la posible isomerización *trans-cis* del β -caroteno y luteína (Colle, Lemmens, Knockaert, Loey & Hendrickx, 2015).

El genotipo y el ambiente de crecimiento también influyen significativamente en el contenido de carotenoides en las plantas. El aumento de la temperatura produce más carotenoides en algunas frutas y su producción mejorada depende del estado de desarrollo (Hernández, Hellín, Fenoll & Flores, 2015).

2.8 Literatura citada

- Aghdam, M. S., & Bodbodak, S. (2014). Postharvest Heat Treatment for Mitigation of Chilling Injury in Fruits and Vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 37–53. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1207-4>
- Aindongo, V. W. Caleb, J. O. Mahajan, V. P. Manley M & Opara, L. U. (2014) Modelling the effects of storage temperature on the respiration rate of different pomegra nate fractions. *South African Journal of Plant and Soil*, 31(4), 227-231, DOI: 10.1080/02571862.2014.944230
- Almanza, P. y C.J. Espinosa. 1995. Desarrollo morfológico y análisis fisicoquímico de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) para identificar el momento óptimo de cosecha. Trabajo final. Especialización en Frutales de Clima Frio, Facultad de Agronomía, UPTC Tunja. 84 p.
- Arce-Romero, A. R., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2016). Mexican plums (*Spondias* spp.): their current distribution and potential distribution under climate change scenarios for Mexico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XXIII(1), 5–19. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.06.020>
- Azcon, B. J. & Talón, M. (1996). Fisiología y bioquímica vegetal. Primera reimpresión. McGRAW-HILL-INTERAMERICANA DE ESPAÑA. 555
- Azcon, B. J. & Talón, M. (2008). Fisiología y bioquímica vegetal. Segunda edición. McGRAW-HILL-INTERAMERICANA DE ESPAÑA. México. 680
- 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(1), 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>
- Britton G. (2008) Functions of Intact Carotenoids. In: Britton G., Liaaen-Jensen S., Pfander H. (eds) Carotenoids. Carotenoids, 4. 187-212. Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7499-0_10
- Cuevas, J. A. 1992. Jocote, ciruela (*Spodias pupurea*). En: J. E. Bermeja y L. León (Eds.). Cultivos marginados; otra perspectiva de 1492. Colección FAO: producción y protección vegetal. Roma, Italia. 26, 109-113.
- Cruz-León, A. Pita-Duque, A. Rodriguez- Haros, B. (2012). Jocates, Jobos, Abales o ciruelas mexicanas. Chapingo México. Centros Regionales Universidad Autónoma Chapingo.
- Fabiana F. De Moura, Alexander Miloff & Erick Boy (2015) Retention of Provitamin A Carotenoids in Staple Crops Targeted for Biofortification in Africa: Cassava, Maize and Sweet Potato, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55:9, 1246-1269, DOI: 10.1080/10408398.2012.724477
- Fonseca, S. C., Oliveira, F. A. R., & Brecht, J. K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: A

- review. *Journal of Food Engineering*, 52(2), 99–119. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00106-6)
- Fonseca, S. C., Oliveira, F. A. R., Lino, I. B. M., Brecht, J. K., & Chau, K. V. (2000). Modelling O₂ and CO₂ exchange for development of perforation-mediated modified atmosphere packaging. *Journal of Food Engineering*, 43(1), 9–15. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00122-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00122-3)
- Flores, R. A., & Yahia, E. M. (2001). Tratamientos físicos en poscosecha de fruta y hortaliza. *Horticultura Internacional*, (1), 80–89.
- Fu, L., Xu, B. T., Xu, X. R., Gan, R. Y., Zhang, Y., Xia, E. Q., & Li, H. Bin. (2011). Antioxidant capacities and total phenolic contents of 62 fruits. *Food Chemistry*, 129(2), 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.079>
- García Tain, Yelene, Pérez Padrón, Jesús, García Pereira, Annia, & Hernández Gómez, Antihus. (2011). Determination of pineapple (*Ananas Comosus*) quality properties Cayena Lisa variety stored under environmental conditions. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1), 62-65. Recuperado en 05 de octubre de 2018, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000100011&lng=es&tlng=en.
- Gill, S. G. F. 2012. Fruticultura - Madurez de la fruta y manejo poscosecha Frutas de clima templado y subtropical. Tercera edición, 493.
- Gross, K. C & Sams E. C. (1984). Changes in cell Wall neutral sugar composition during fruit ripenin a species survey. *Phytochemistry*, 23(11), 2457-24661. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)84075-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)84075-3)
- Haminiuk, C. W. I., Maciel, G. M., Plata-Oviedo, M. S. V., & Peralta, R. M. (2012). Phenolic compounds in fruits - an overview. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(10), 2023–2044. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03067.x>
- Hopia, A., & Heinonen, M. (1999). Antioxidant activity of flavonol aglycones and their glycosides in methyl linoleate. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(1), 139–144. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0060-0>
- Howitt, C. A., & Pogson, B. J. (2006). Carotenoid accumulation and function in seeds and non-green tissues. *Plant, Cell and Environment*, 29(3), 435–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01492.x>
- Inestroza-Lizardo, C., Voigt, V., & Muniz, A., & Gomez-Gomez, H. (2016). Métodos de enfriamiento aplicables a frutas y hortalizas enteras y mínimamente procesadas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 17 (2), 149-161.
- Kaur, C., & Kapoor, H. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables - The Millennum's health. *Journal of Food Science and Technology*, 36, 703–725. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.00513.x>

- Kader A. A. (2008). Perspective. Flavor quality of fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88:1863–1868. Department of Plant Sciences, University of California, Davis, CA 95616, USA. DOI: 10.1002/jsfa
- Kader, A. a. (2002). Biología y Tecnología Postcosecha: un Panorama. *Tecnología Postcosecha de Cultivos Hortofrutícolas*, 584.
- Kader, A. A. (1994). Regulation of Fruit physiology by controlled/modified atmospheres. *Acta Horticulturae*, 398, 59-70. 10.17660/ActaHortic.1995.398.6
- Lakshminarayana, R., Raju, M., Krishnakantha, T. P., & Baskaran, V. (2005). Determination of major carotenoids in a few Indian leafy vegetables by high-performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(8), 2838–2842. <https://doi.org/10.1021/jf0481711>
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Alia-Tejacal, I., Núñez-Colín, C. A., Jiménez-Hernández, J., Pelayo-Zaldívar, C., López-Martínez, V., ... Valle-Guadarrama, S. (2014). Postharvest physiology and technology of *Spondias purpurea* L. and *S. mombin* L. *Scientia Horticulturae*, 174(1), 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.016>
- Miller, A., & Schaal, B. (2005). Domestication of a Mesoamerican cultivated fruit tree, *Spondias purpurea*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(36), 12801–12806. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505447102>
- Morton, J. 1987. Purple mombin. In: Fruits of warm climates. J. F. Morton (Ed.). Creative Resource Systems Inc. Miami, Fl. USA. pp. 242-245.
- Naczek, M., & Shahidi, F. (2004). Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*, 1054(1–2), 95–111. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.08.059>
- Namitha, K. K., & Negi, P. S. (2010). Chemistry and biotechnology of carotenoids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(8), 728–760. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2010.499811>.
- Philips, C.A., 1995. Review: modified atmosphere packaging and its effect on the micro-biological quality and safety of produce. *International Journal Food Science Technology*. 31(6), 463–479.
- Priyadarshani, A.M. B., & Jansz, E. R. (2014). A critical review on carotenoid research in Sri Lankan context and its outcomes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(5), 561–571. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2011.595019>
- Ramírez-Hernández, B. C. 2004. Etnobotánica y ecofisiología de la ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F

- Reid, M. S. (2007). Maduración e Índices de Madurez. *Tecnología Postcosecha de Cultivos Hortofrutícolas*, 63–71.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México, D. F.
- Rispail, N., Morris, P. & Webb, K. (2005). Phenolic compounds: extraction and analysis. In: Lotus Japonicus Handbook (edited by A. Márquez). Pp. 349–354. Berlin: Springer.
- Robbins, R. J. (2003). Phenolic acids in foods: An overview of analytical methodology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(10), 2866–2887. <https://doi.org/10.1021/jf026182t>
- Romajaro, F. Riquelme, F. Pretel, M. T. Martínez, G. Serrano, M. Martínez, C. Lozano, P. Segura, P. Luna, P. A. 1996. Nuevas tecnologías de conservación de frutas y hortalizas: atmósferas modificadas. Mundi prensa. Madrid, Barcelona. México. pp. 217.
- Saini, R. K., Nile, S. H., & Park, S. W. (2015). Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities. *FRIN*, 76, 735–750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.047>
- Saltveit, M. E. (1999). Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 279–292. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00091-X)
- Souza, F.X.de, 2008. Spondias mombin, yellow mombin. In: Janick, J., Paull, R.E. (Eds.), *The Encyclopedia of Fruit & Nuts*. CABI Publishing, 31–34.
- Vargas-Suárez, A., Juárez-López, P., López-Martínez, V., Flores-Pérez, L. J., Sánchez-Guillén, D., & Alia-Tejacal, I. (2017). Botânica e fisiologia/ botany and physiology antioxidant activity and physicochemical parameters in 'cuernavaqueña' mexican plum (*Spondias purpurea* L.) at different ripening stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39(4), e-787. Epub September 12, 2017. <https://dx.doi.org/10.1590/0100-29452017787>
- Vermerris, W., & Nicholson, R. (2006). Families of phenolic compounds and means of classification. *Phenolic Compound Biochemistry*, 1–34. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5164-7_1
- Yahia E., 1995. La tecnología de las atmósferas modificadas y controladas I parte, *Horticultura Internacional*. 37-39.
- Yahia, EM. (2011). Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits, 4. Woodhead Publishing, Cambridge, UK
- Williamson, G., & Manach, C. (2005). Bioavailability and bioefficacy of polyphenols in humans.II.Review of 93 intervention studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81, 243S–255S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.1.230S> [pii]

3 **CALIDAD POSCOSECHA EN FRUTOS DE CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea*) ALMACENADOS A 14 Y 25 °C CON MICROPERFORADO***

Resumen

El fruto de ciruela mexicana es altamente perecedero, aun siendo cosechados en madurez fisiológica, su vida se limita a pocos días. Asociado a ello, el fruto a muy bajas temperaturas tiende a sufrir daños por frío. Por lo que el principal objetivo fue evaluar el efecto de una atmósfera modificada con diferentes niveles de microperforado (0, 3, 6, 10) sobre las características fisicoquímicas de frutos de ciruela mexicana cosechados en madurez fisiológica. Se utilizaron seis frutos como unidad experimental con tres repeticiones, se almacenaron a 14 y 25 °C durante 14 d. El uso de las AM permitió la reducción de la pérdida de peso en el tratamiento M0-T14 (1.42 %) al día 14 y de firmeza (2.12 N) en los frutos almacenados a 14 °C. En las características químicas (pH, SST y acidez) fue posible observar un comportamiento similar, los SST (24.73 °Brix) y pH aumentaron y la acidez disminuyó. Igualmente, la temperatura permitió conservar los frutos durante 14 d mientras los almacenados a 25 °C se conservaron durante ocho días en condiciones de consumo.

Palabras clave: madurez fisiológica, calidad poscosecha, características fisicoquímicas.

*Tesis: Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ing. Adriana Herrero Galindo
Director (a): Dra. Ma. Teresa Beryl Colinas León

POST-HARVEST QUALITY IN FRUITS OF MEXICAN PLANT (*Spondias purpurea*) STORED AT 14 AND 25 °C WITH MICROPERFORATED*

Abstract

The harvest of Mexican plum fruits will depend mainly on their destination, in some regions it is possible to distribute it in local and regional markets. However, it is highly perishable, even when harvested at physiological maturity, its life is limited to a few days. Associated with this, at very low temperatures the fruit tends to suffer damage by cold, so the main objective of this study was to evaluate the effect of a modified atmosphere with different levels of microperforated (0, 3, 6, 10) on the physicochemical characteristics of Mexican plum fruits harvested at physiological maturity. Six fruits were used as an experimental unit with three replications, stored at 25 and 14 °C for 14 days. The use of MA allowed the reduction of weight loss and firmness in fruits stored at 14 °C. In the chemical characteristics (pH, SST and acidity) it was possible to observe a similar behavior, the SST and pH increased and the acidity decreased. Similarly, the temperature allowed to preserve the fruits for 14 days while those stored at 25 °C were kept for eight days under consumption conditions.

Keywords: physiological maturity, post-harvest quality, physico-chemical characteristics

* Thesis: Universidad Autónoma Chapingo
Author: Ing. Adriana Herrero Galindo
Advisor: Dra. Ma. Teresa Beryl Colinas León

3.1 Introducción

La familia Anacardiaceae está conformada por 74 géneros, entre ellos se encuentra el género *Spondia*, del que existen tres especies consideradas nativas de México: *Spondias purpurea*, *mombin* y *raldkoferi* (Miller & Schaal, 2005). Son frutos que se caracterizan por tener dos épocas de producción: la húmeda que se extiende de agosto a noviembre y la seca, de abril a junio (Pimenta & Ramírez, 2003), es un fruto que crece en suelos arenosos y con poca precipitación de lluvia (Ramírez Hernández et al., 2008).

La especie *S. purpurea* tiene algunas características diferentes al resto de las especies como el color, de las que se pueden encontrar frutos de color amarillo, rojo, anaranjado y morado, así como frutos de mayor tamaño. Cabe señalar que es la especie que se produce a mayor escala, por lo que su venta es en mercados regionales y nacionales, en los meses de septiembre y octubre, en cambio las especies *S. raldkoferi* y *mombin* son más de recolección y de la época seca (Avitia, Castillo y Pimienta, 2003; Del Rocío Ruenes-Morales, Casas, Jiménez-Osornio, & Caballero, 2010). Algunos nombres comunes son: jocote, ciruela mexicana, ovo, aval, jobo, jobillo (Ruenes-Morales et al. 2010; Cruz-León, Pita-Duque y Rodríguez-Haros, 2012). La especie *Spondias purpurea* es la especie con mayor producción por sus características organolépticas, principalmente en pequeñas extensiones y en huertos familiares en algunos estados de la República Mexicana como Chiapas y Morelos. No se tienen índices de cosecha establecidos, no obstante, Martins, Silvia, Alves y Filgueiras (2003), indican que diversos criterios se han empleado para establecer el índice de madurez, que está basado en aspectos físicos, químicos y fenológicos de la planta como el número de días de floración hasta el pleno desarrollo de la fruta. Aunque en ocasiones únicamente se usa el color como criterio para realizar la cosecha, debido a que es un producto altamente perecedero, y sensible a los daños mecánicos, son cosechados verdes o medio verdes, principalmente aquellos que van destinados a la venta.

Por ser un fruto climatérico es posible cosecharlo en madurez fisiológica y continuar con su proceso de maduración para alcanzar a desarrollar sus propiedades químicas y organolépticas que los hacen atractivos al consumidor. Sus costos de producción son bajos y el manejo agronómico se reduce a la fertilización y control de plagas (Alia-Tejacal, 2012). Sin embargo, se ha perdido una gran diversidad genética, principalmente porque en los últimos años se ha sustituido por cultivos económicamente más rentables.

Otro problema al que se enfrentan los productores es la alta perecibilidad del fruto que al llegar al mercado tiene pérdidas poscosecha considerables, ya que su epicarpio delgado es susceptible al daño mecánico durante el transporte. Para controlar estas pérdidas poscosecha, existen tecnologías que permiten prologar la vida de anaquel hasta llegar al consumidor, entre ellas están la refrigeración, el uso de recubrimientos, atmósferas controladas y modificadas, ente otros.

La atmósfera modificada mediante el uso de películas plásticas para la conservación de frutas ocasiona un cambio en las condiciones gaseosas del entorno inmediato del producto como consecuencia de su metabolismo, generalmente la atmósfera interna se empobrece en O_2 y enriquece en CO_2 , el exceso de CO_2 puede causar desordenes fisiológicos relacionados con maduraciones anormales (Romojaro et al., 1996).

Las frutas y verduras son productos altamente perecederos que continúan con sus procesos metabólicos después de la cosecha. El uso del empaque con AM en la conservación poscosecha de productos hortofrutícolas es una técnica importante para reducir las pérdidas y mantener la calidad en todo el sistema de distribución (Kader, 2007).

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de las propiedades fisicoquímicas de frutos de ciruela mexicana almacenados en una atmósfera modificada con diferentes niveles de microperforado por 14 d a 14 y 25 °C.

3.2 Metodología

3.2.1 Sitio de recolecta

El material vegetal se colectó de un huerto familiar en el municipio de Atlatlahuacan, Morelos, su clima predominante es templado frío, presenta una temperatura media anual de 20 °C. Los frutos se cosecharon en octubre del 2017 en estado de madurez fisiológica (epicarpio verde). Posteriormente, se trasladaron al laboratorio de usos múltiples del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizaron bolsas de polietileno de baja densidad 0.062 µm de grosor y se perforaron con un alfiler de 200 µm donde se colocaron seis frutos como unidad experimental con tres repeticiones para cada tratamiento. Se usaron dos temperaturas de almacenamiento (14 y 25 °C) y cuatro niveles de microperforado (0, 3, 6, 10) (Cuadro 4). Las variables evaluadas durante el periodo de almacenamiento fueron, pérdida de peso, firmeza, sólidos solubles totales (SST), acidez titulable, pH.

Cuadro 4. Diseño de tratamiento ensayados para evaluar el comportamiento poscosecha de ciruela mexicana

Factores	Niveles				Combinaciones de tratamientos		Clave del tratamiento	
	0	3	6	10	M0 a 14 °C	M0 a 25 °C	M0-T14	M0-T25
Microperforado (µm)								
Temperatura (°C)	14	25			M3 a 14 °C	M3 a 25 °C	M3-T14	M3-T25
					M6 a 14 °C	M6 a 25 °C	M6-T14	M6-T25
					M10 a 14 °C	M10 a 25 °C	M10-T14	M10-T25

3.3 Evaluación de propiedades físico-químicas

3.3.1 Pérdida de peso

El peso de cada unidad experimental se obtuvo el día del almacenamiento con una balanza digital (Ohaus, USA), se registró cada tercer día durante el periodo de almacenamiento. Los resultados se expresan en % de pérdida de peso; como se expresa en la Ecuación (2).

$$\% \text{ pérdida de peso} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100 \quad (2)$$

3.3.2 Firmeza

La firmeza se midió con un texturómetro FDV-30 (Greenwich, CT 06836, EE.UU) de puntal cónico (8 mm de diámetro). Las mediciones se hicieron en dos frutos, en cada fruto se midieron dos puntos en la zona ecuatorial y los resultados se expresan en newtons (N).

3.3.3 Sólidos solubles totales

Para la cuantificación de los SST se consideraron dos frutos para extraer una gota de jugo de la pulpa, la cual se colocó en el muestreador del refractómetro ATAGO PAL-1. Los resultados se expresan en grados Brix.

3.3.4 pH

El pH se evaluó con 10 g de pulpa molida a la que se agregaron 50 mL de agua destilada. Posteriormente, se midió el pH con un potenciómetro (Corning 12 Scientific Instruments, EE.UU).

3.3.5 Acidez

La acidez titulable se determinó bajo la metodología de la AOAC (2002). Se pesaron 5 g de pulpa en un mortero, y se agregaron 10 mL de agua destilada. Se

tomó una alícuota de 5 mL, se le agregaron dos gotas de fenolftaleína como indicador e hidróxido de sodio (NaOH) al 0.1N. Los resultados se expresan en % de ácido cítrico por ser el predominante en este fruto.

3.3.6 Respiración y producción de etileno

La respiración se cuantificó mediante un sistema estático, consistió en colocar seis frutos en un recipiente de volumen conocido cerrado herméticamente, después de una hora se tomó 1mL del espacio de cabeza para ser inyectado a un cromatógrafo de gases Varian (3400CX®, USA) equipado con una columna capilar Chrompack® tipo paraploteo Q, detector de conductividad térmica (TCD), detector por ionización de flama (FID). Se usaron condiciones de 80 °C, 150 °C y 170 °C en la columna, inyector y detectores, respectivamente, con N₂ como gas de arrastre y presión en la columna de 158.5 Kpa.

El diseño estadístico usado fue un modelo mixto y se aplicó un análisis de comparación de medias de Tukey-Kramer ($P \leq 0.05$).

El modelo mixto se expresa en la Ecuación (1) (Cadena y Castillo, 2002):

$$Y = X\beta + U\xi + \varepsilon \quad (1)$$

donde:

Y = es un vector ($n \times 1$) de observaciones.

β = es un vector ($s \times 1$) de parámetros desconocidos de efectos fijos.

X = es una matriz ($n \times s$) conocida, usualmente denominada matriz diseño de efectos fijos.

ξ = es un vector ($t \times 1$) de efectos aleatorios, es de la forma $\xi' = [\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_c]$ con ξ_i de orden t_i y $t_1 + t_2 + \dots + t_c = t$ y $\xi' = (0, \sigma_e^2 I_n)$ con $\text{cov}(\xi_i, \xi_{i'}) = 0$ para $i \neq i'$.

$U = [U_1, U_2, \dots, U_c]$ Es una matriz (n x t) de incidencias, conocida, con U_i de dimensiones n x t_i , denominada matriz diseño de efectos aleatorios para estudios longitudinales.

$\epsilon \sim (0, \sigma_e^2 I_n)$ es el vector (n x 1) de términos de error aleatorios.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Pérdida de peso

La Figura 5 muestra que los frutos de ciruela almacenados a 14 °C alcanzaron la madurez comercial a los 14 d. Sin embargo, el tratamiento M10-T25 a temperatura ambiente se registró la mayor pérdida de peso (3.7 %) al octavo día del almacenamiento. En contraste, el tratamiento M10-T14 el fruto perdió 1.7 % de peso con ocho días de almacenamiento. Este efecto se debe a que ambos empaques permitieron una mayor evaporación del agua. El efecto de los factores temperatura, tiempo y microperforado resultaron ser significativos en esta variable ($P \leq 0.05$). La significancia de la interacción microperforaciones-temperatura mostró que todos los niveles de microperforado a 14 °C tuvieron un efecto estadísticamente superior sobre la pérdida de peso (Figura 6).

Maldonado-Astudillo et al. (2014) mencionan que en el ecotipo *Spondia purpurea* cuernavaqueña almacenadas a 25 °C pierden 11.46, 11.09 y 12.38 % de peso de los frutos cosechados en etapa inmadura, medio madura y madura a los seis días de almacenamiento. Pérez-López, Saucedo-Veloz, Arévalo-Galarza y Muratalla-Lua (2004) reportan que los frutos almacenados a 20 °C pierden hasta 17.6 % de su peso.

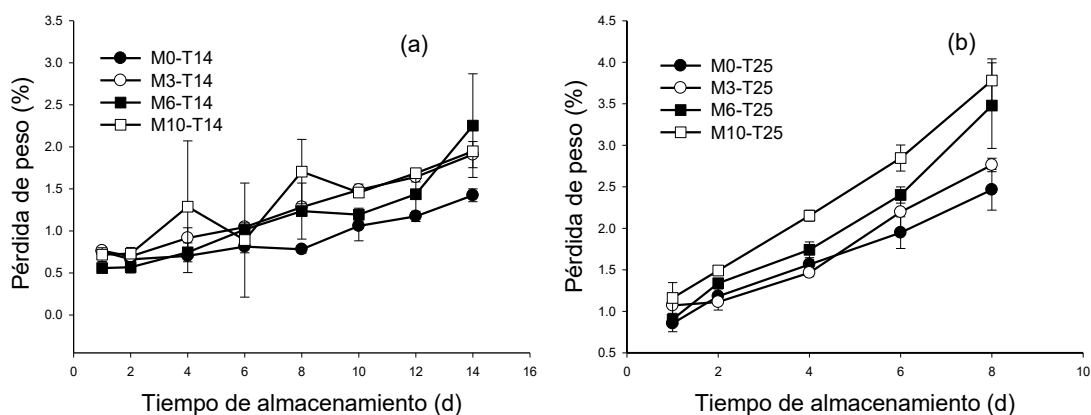


Figura 5. Comportamiento de la pérdida de peso en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Pérdida de peso en frutos almacenados a 14 °C, (b) Pérdida de peso en frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

Bautista-Baños, Díaz-Pérez, Barrera-Necha y Bravo-Luna (2003) reportan variaciones en la pérdida de peso en frutos de ciruela mexicana almacenados a 25 °C dependiendo de la etapa de maduración, las pérdidas fueron de 2.11 a 4.07 % en frutas en proceso de maduración, mientras que en frutos maduros varío de 3.00-3.65 %; valores que coinciden con los encontrados en este trabajo. Sousa-Gallagher, Mahajan y Mezdad (2013) mencionan que la pérdida de peso se produce principalmente a través de la transpiración, que a su vez está influenciada por la diferencia de presiones parciales del agua entre la superficie de la fruta y el espacio de cabeza que lo rodea, y sus procesos metabólicos de respiración y la descomposición de los sustratos. Por otro lado, Castellanos et al. (2016) indican que la diferencia en la pérdida de peso se da como consecuencia del tiempo transcurrido para la saturación del espacio de cabeza, mayor para los empaques con más perforaciones y a temperaturas más altas como resultado de los mayores tipos de cambios de agua vapor hacia el exterior. Del Pilar Pinzón, Fischer, y Corredor (2007) reportan que los frutos verdes tienden a perder 40 a 50 % de peso, eso se lo atribuyen a que los frutos fueron cosechados antes de

la abscisión por lo que aún no se habían abastecido de suficiente agua que emplearían en la respiración y transpiración.

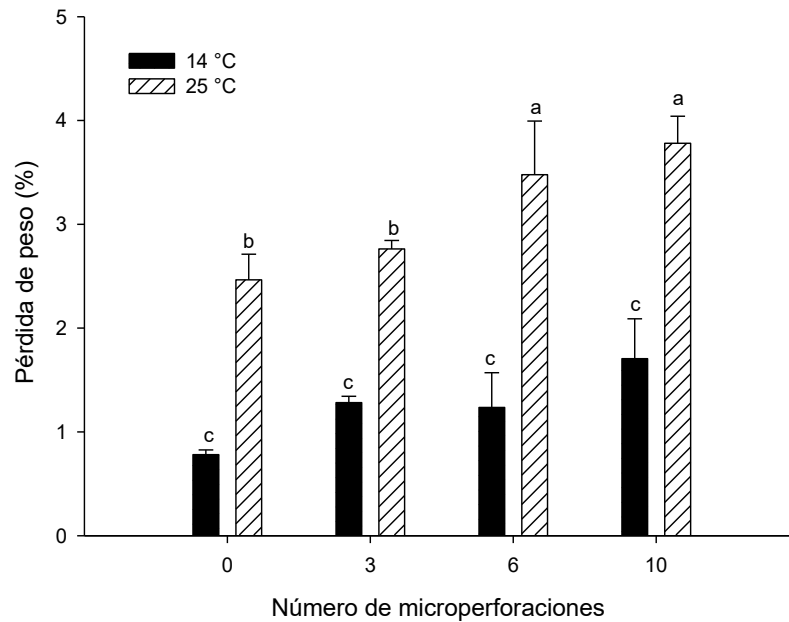


Figura 6. Pérdida de peso al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.

Gallo (1996) menciona que la pérdida de peso también se debe a que, durante el proceso de maduración, el almidón presente en la cáscara se hidroliza para formar azúcares. Milanez, Neves, Colombo, Shahab, y Roberto, (2018) mencionan que los frutos frescos tienden a tolerar pérdidas de peso máxima de 5 a 10 % sin causar marchitez o arrugas en la superficie. Por otro lado, Ramos-Ramírez et al. (2008) consideran que pérdidas de peso mayores a 5 % causan un deterioro en la calidad visual del fruto.

La pérdida de peso se le puede atribuir a la despolimerización y ruptura de la pared celular, además de la actividad metabólica y respiratoria (Silvia et al., 2009). La pérdida de peso no solo compromete la calidad de la fruta sino que reduce el tiempo poscosecha del fruto (Milanez, Nevez, Colombo, Shahab y Roberto 2018). Los autores consideran que los productos perecederos, principalmente los climatéricos aun siendo almacenados en condiciones ideales sufren pérdida de peso por el efecto combinado de la respiración y transpiración (Milanez et al., 2018). Sousa et al. (2000) reportan que frutos maduros de *Spondias purpurea* podrían almacenarse durante cuatro, diez o quince días si se mantienen a 10, 15 y 20 °C con una humedad relativa de 69, 73 y 83 % combinada con atmósferas modificadas, lo que reduce la pérdida de peso que inevitablemente se produce en la fruta.

3.4.2 Firmeza

Se observó que la interacción temperatura-tiempo influyó significativamente, puesto que los frutos almacenados a 25 °C presentaron mayor pérdida de firmeza en menor tiempo que aquellos almacenados a 14 °C, donde se conservaron más firmes hasta los 14 d del almacenamiento. Al día ocho del almacenamiento el tratamiento M0-T14 presentó el valor más alto (4.96 N) de firmeza. La temperatura permitió conservar la calidad de los frutos posiblemente a un retraso del proceso de maduración (Figura 7). La interacción temperatura-microperforado fue significativa ($P \leq 0.05$) (Figura 8). Dado que el efecto sinérgico de la interacción microperforado temperatura sobre los frutos de ciruela almacenados a 14 °C mostraron una firmeza significativamente superior a la de frutos almacenados a 25 °C.

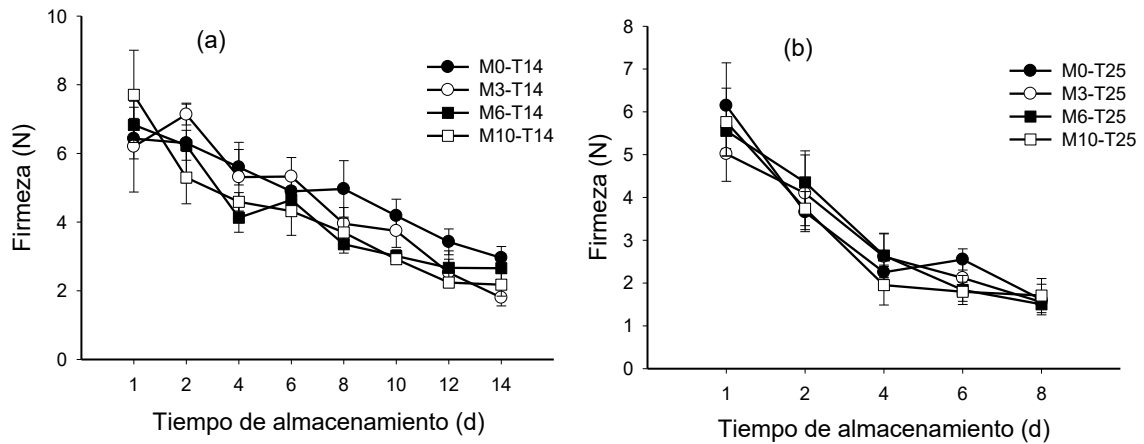


Figura 7. Comportamiento de la firmeza en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Firmeza de los frutos almacenados a 14 °C, (b) Firmeza de los frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

Gwanpua et al. (2012) explican que la evolución de las propiedades como la firmeza se ha considerado generalmente solo como una función de la temperatura y pocos estudios han considerado la influencia de los niveles de CO_2 y O_2 cuando son almacenadas en AM. Parra y Fischer (2013) explican que a una temperatura más baja, la velocidad de degradación de los compuestos estructurales en la pared celular, como las pectinas, las hemicelulosas y la capacidad de retención de agua disminuye, por lo tanto, la pérdida de firmeza se reduce. Asimismo, en las reacciones de oxidación metabólica de los sustratos, la disponibilidad reducida de O_2 retrasa estos procesos y por lo tanto, la pérdida de firmeza (Gwanpua et al., 2012).

El comportamiento observado en los frutos almacenados a 25 °C se debe a que la pérdida de firmeza se asocia con pérdida de agua, síntesis de carbohidratos libres a partir de carbohidratos de reserva y aumento de enzimas que actúan sobre la pared celular (Arenas-Ocampo; Evangelista-Lozano; Arana-Errasquin, Jiménez-Aparicio & Dávila-Ortíz (2003). Por otro lado, Osterloh (1996) menciona

que en las primeras etapas de la maduración del fruto su textura y su consistencia son óptimas; pero durante la maduración la sustancia adherente de las células, la propectina va degradándose junto con las sustancias pécticas, lo cual altera la textura y la consistencia del fruto.

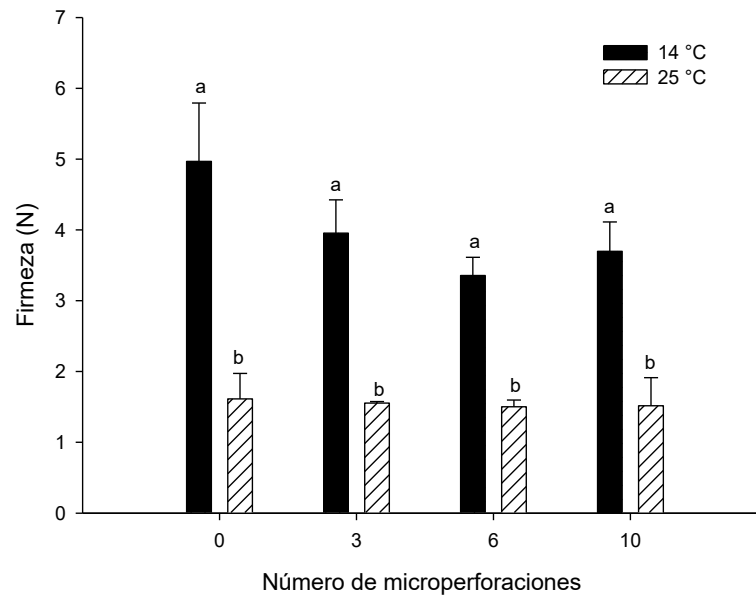


Figura 8. Firmeza al octavo día de almacenamiento de frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25°C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y M0. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.

Maldonado-Astudillo et al. (2014) reportan la firmeza de frutos maduros en la especie *S. purpurea* ecotipo cuernavaqueña de 2.6 N, mientras que para los inmaduros fue de 5.6 N, valores cercanos a los encontrados en este trabajo. Sin embargo, reportan que los frutos inmaduros tienden a perder mayor firmeza durante el almacenamiento 64 % y 54 % en maduros almacenados a 25 °C.

La firmeza es una de las principales características que determinan la calidad sensorial de un fruto y se utiliza frecuentemente como un índice de frescura, palatabilidad y valor nutricional del producto. Se relaciona con la intensidad del

sabor y dulzura (García-Taín, García-Pereira, Hernández-Gómez & Pérez-Padrón, 2011). La degradación de carbohidratos poliméricos (pectina y celulosa) debilita las paredes celulares y las fuerzas cohesivas que mantienen a las células unidas entre ellas, causando el ablandamiento (Gallo, 1996).

3.4.3 Sólidos solubles totales (SST)

Al inicio de la evaluación los frutos presentaron en promedio 10 °Brix durante el tiempo de almacenamiento se incrementó hasta alcanzar 24.73 °Brix y 21.73 °Brix en los tratamientos M6-T25 y M6-T14 respectivamente a los ocho días del almacenamiento (Figura 9). Este incremento se debió a que los frutos se cosecharon en madurez fisiológica y al ser un fruto climatérico permitió continuar con la maduración. La interacción temperatura tiempo fue significativa indicando que frutos almacenados a 14 °C y empacados a los cuatro niveles de microperforado mostraron los valores de °Brix más bajos (Figura 10).

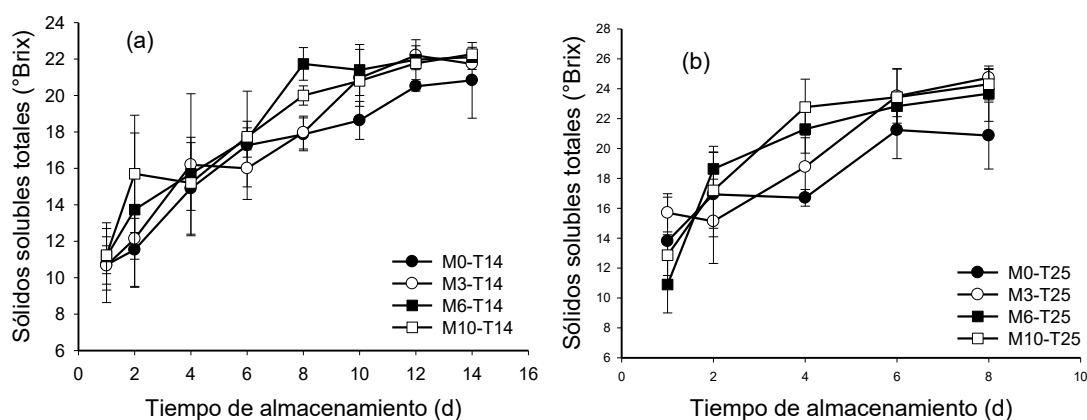


Figura 9. Comportamiento de sólidos solubles totales (SST) en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) SST de frutos almacenados a 14 °C, (b) SST de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

Pérez-Arias et al. (2008) registran e valores extremos de 12.47 y 17.43 °Brix como el más alto en ecotipos de ciruela mexicana en madurez comercial. Por otro lado García-Gonzalez et al. (2016) evaluaron tres estados de maduración en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña: maduros, cambiantes y verdes, almacenados a 5 °C durante cinco y diez días, encontraron valores de 25 °Brix en frutos maduros al final del almacenamiento y 25.8 °Brix en frutos cambiantes. Sin embargo, los frutos verdes no superaron los 20 °Brix principalmente aquellos que se almacenaron por diez días. Esto sugiere que hay un efecto negativo del almacenamiento por varios días a bajas temperaturas, debido a que afecta la acumulación de azúcares que contribuyen al sabor del fruto, durante la poscosecha.

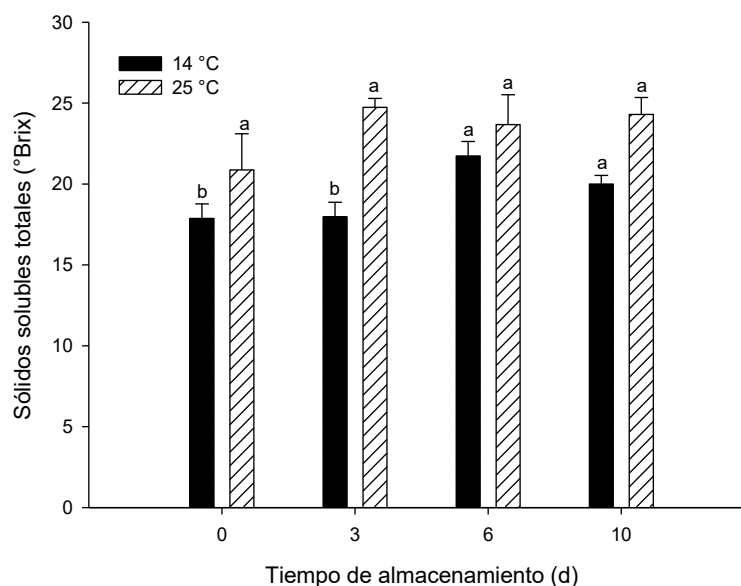


Figura 10. Sólidos solubles totales (SST) al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.

Kays (2004) explica que cuando el fruto está madurando en la planta, los azúcares incrementan su concentración por la translocación de sacarosa desde las hojas; sin embargo, también se lleva a cabo el reciclaje de los sustratos respiratorio desde el carbono almacenado en el fruto. Aunque la acumulación de los azúcares depende principalmente de la variedad, del rendimiento asimilatorio de las hojas, de la relación hoja/fruto, de las condiciones climáticas durante el desarrollo, del estado de desarrollo y de la madurez (Pinzón et al., 2007). Beckles (2012) explica que la prácticas poscosecha (temperatura de almacenamiento poscosecha, atmósferas modificadas, y tratamientos físicos) pueden afectar el contenido de azúcar.

3.4.4 pH

La Figura 11 muestra el comportamiento del pH, como resultado del proceso de maduración. La interacción temperatura tiempo microperforado afectó significativamente ($P \leq 0.05$) el pH del fruto. Los tratamientos a 25 °C mostraron un efecto significativamente superior sobre el pH que los tratamientos a 14 °C. Así, dentro de cada temperatura de almacenamiento, el efecto de los niveles de perforación afectó por igual el pH y diferente entre temperaturas (Figura 12). Maldonado-Astudillo et al. (2014) reportan un incremento del pH durante el periodo de almacenamiento en el proceso de maduración. Los frutos cosechados en estado maduro presentaron valores más altos respecto a los cosechados en madurez fisiológica.

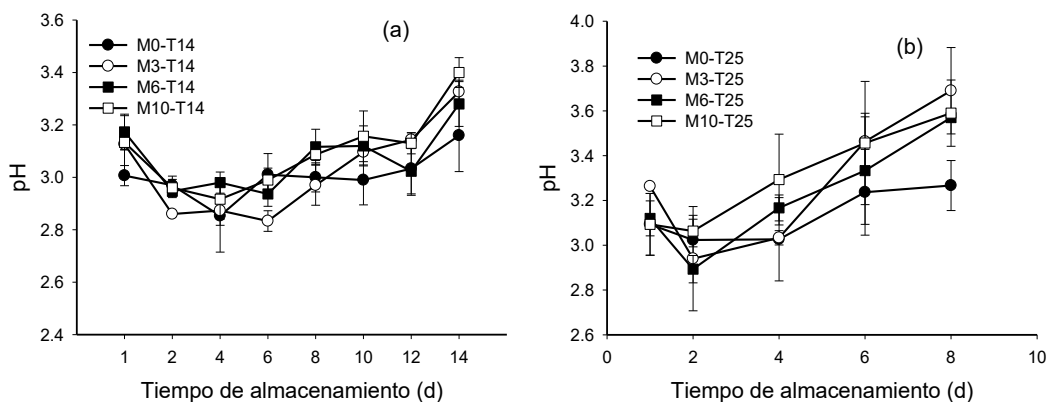


Figura 11. Comportamiento del pH en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) pH de frutos almacenados a 14 °C, (b) pH de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

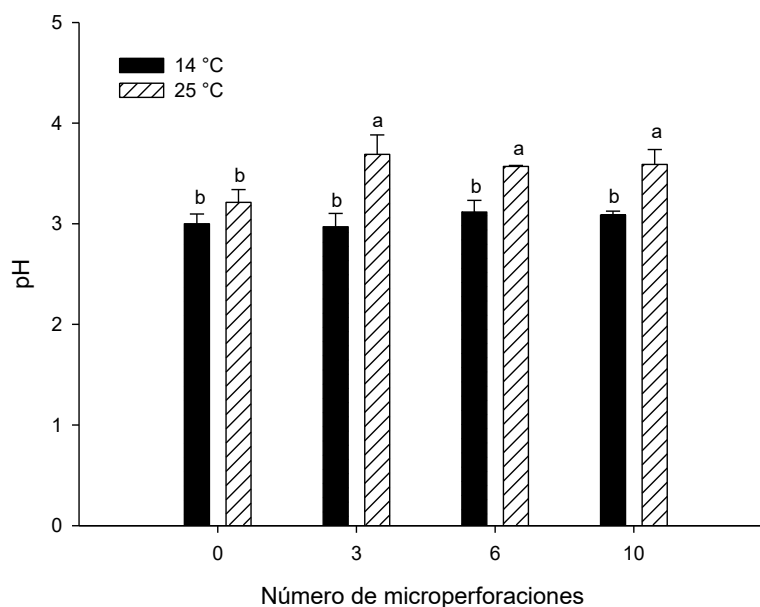


Figura 12. pH al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P \leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.

Ramírez Hernández et al. (2008) reportan que el pH en *Spondias purpurea* es variable, oscilando entre 2 y 6 en función de la variedad y la región donde se cultiva la fruta. Además, las variedades cultivadas de *Spondias purpurea* presentan valores de pH ligeramente más altos (3.3) que las variedades silvestres.

3.4.5 Acidez

Se encontró que a medida que aumentaba el pH la acidez disminuyó, como resultado del proceso de maduración. La Figura 13 muestra que los frutos almacenados a 25 °C finalizaron su vida de anaquel al octavo día, mientras que los frutos a 14 °C alcanzaron 14 días de almacenamiento, siendo la temperatura el factor que influyó, sobre el proceso de la maduración. La mayor acumulación de acidez se obtuvo en frutos almacenados a 14 °C, el efecto de las bajas temperaturas permiten disminuir la tasa de respiración (Figura 14). Sin embargo, la interacción microperforado temperatura no fue significativa, por lo que el efecto de los tratamientos fue igual sobre la acidez.

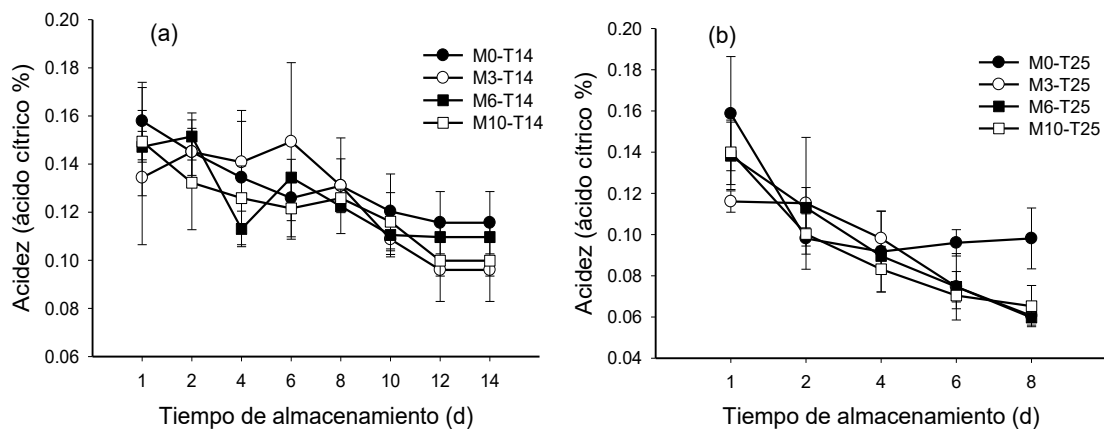


Figura 13. Comportamiento de la acidez en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Acidez de frutos almacenados a 14 °C, (b) Acidez de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10.

Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

En esta fruta el contenido de ácido se expresa como unidades porcentuales de ácido cítrico, dado que esta es la forma predominante de ácido orgánico (Ramos-Ramírez, 2004). Maldonado-Astudillo et al. (2014) reportan valores de acidez que oscilan entre 0.2 y 2.0 %. Los autores mencionan que se pueden encontrar varios ecotipos con contenidos muy bajos de ácido cítrico (0.012 %), lo que coincide con lo encontrado en este trabajo. (Osterloh, 1996) menciona que en la mayoría de los frutos se observa una disminución de la acidez durante la maduración y se debe a una alta tasa metabólica en esta fase, tal comportamiento coincide con lo encontrado en el presente trabajo.

Parra y Fischer (2013) explican que en los frutos frescos, los ácidos orgánicos se acumulan durante el crecimiento y luego se utilizan como sustratos en los procesos de respiración y la producción de energía durante la maduración. Banda et al. (2015) mencionan que cuando se emplean las AM y al aumentar la temperatura y la concentración de O₂ en el espacio de cabeza, estas reacciones de oxidación ocurren más rápido de la misma manera que las reacciones que conducen a cambios en otras propiedades de las frutas.

Por otro lado, los ácidos orgánicos contribuyen en gran parte al sabor, en una relación típica entre azúcares y ácidos en las diferentes especies frutales (Wills, 1998). Akbudak, Akbudak, Seniz, y Eris, (2007) encontraron que el EMAM proporciona un medio para amortiguar la senescencia, y aunque se utilice en diferentes cultivares, materiales de empaque, temperaturas de almacenamiento y composición del aire de partida, el efecto principal es retardar la acumulación de SST y acidez.

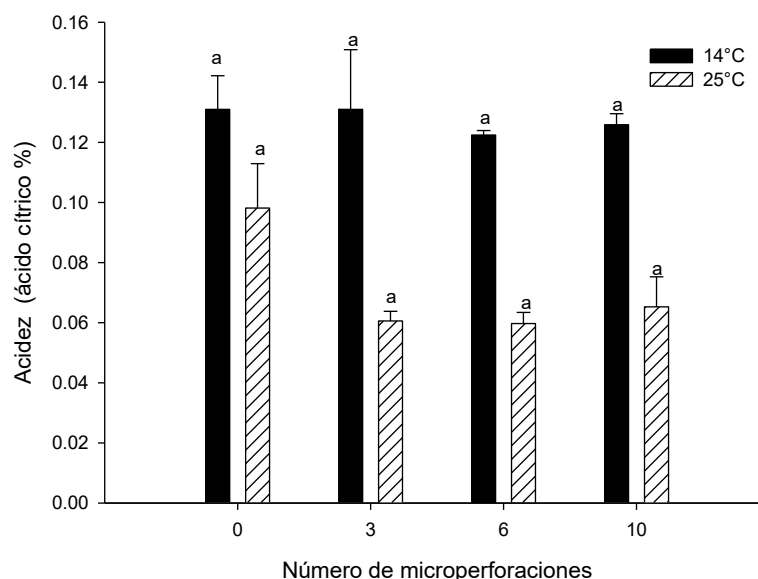


Figura 14. Acidez titulable al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14°C y 25°C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey-Kramer, $P\leq 0.05$). La barra corresponde al error estándar de la media.

3.4.6 Respiración y producción de etileno

Durante el periodo de almacenamiento la mayor producción de etileno se observó en los frutos almacenados a 25°C , a esta temperatura en el día cuatro se registró la mayor producción de etileno principalmente en el tratamiento M3-T25 ($93.39 \mu\text{L kg}^{-1} \text{h}^{-1}$). Con el mismo número de microperforaciones a 14°C se observó un incremento de etileno ($34.1 \mu\text{L kg}^{-1} \text{h}^{-1}$) al octavo día (Figura 15). En lo que respecta a la velocidad de respiración los frutos de los tratamientos M0-T14 y M0-T25 fueron más estables en la producción de CO_2 durante el almacenamiento comparado con el resto de los tratamientos que presentan variación (Figura 16). Los valores reportados son superiores a los encontrados por Suárez-Vargas et al. (2017) quienes evaluaron cuatro estados de maduración, el valor más bajo se reportó en frutos verdes ($3.92 \mu\text{L kg}^{-1} \text{h}^{-1}$) y en los frutos maduros se observó la mayor producción ($9.43 \mu\text{L kg}^{-1} \text{h}^{-1}$), es importante señalar que los frutos no los almacenaron. En cuanto a la producción de CO_2 no reportan diferencias entre los

estados de maduración, el valor más alto es en frutos cosechados en madurez comercial con $1.23 \text{ mL kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ y el más bajo fue de $1.1 \text{ mL kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en frutos verdes, en cambio en el presente trabajo los valor más alto son de $38.32 \text{ mL kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en el tratamiento M6-T14 y $92.79 \text{ mL kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en el tratamiento M10-T25.

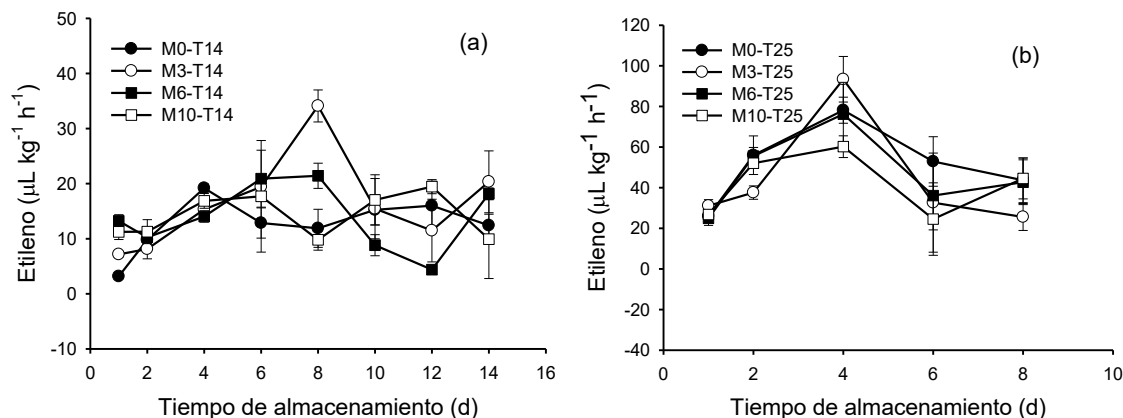


Figura 15. Comportamiento de la producción de etileno en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforación y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Etileno de frutos almacenados a $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) Etileno de frutos almacenados a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

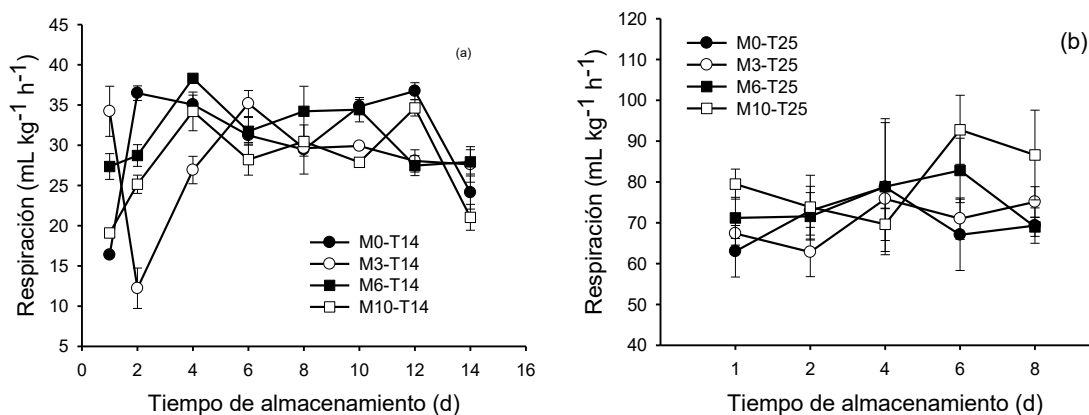


Figura 16. Comportamiento de la velocidad de respiración en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforación y almacenadas a

dos temperaturas (T). (a) Etileno de frutos almacenados a 14 °C, (b) Etileno de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

García-González et al. (2016) evaluaron la velocidad de respiración de frutos de ciruela mexicana almacenados a 20 °C en tres estados de maduración encontrando que se incrementó y disminuyó durante el almacenamiento, lo que sugiere un comportamiento climatérico. Este mismo comportamiento fue reportado por Osuna, Pérez, Vázquez y Gómez (2011) en frutos de ciruela mexicana de Nayarit, México, almacenados a 5 °C. Por otro lado, Valero y Serrano (2010) menciona que cuando los frutos se almacenan a temperaturas entre 2 y 10 °C presentan daño por frío, que afecta principalmente a las membranas celulares, ocasionando reacciones secundarias como el incremento en la velocidad de respiración. Otro factor que afecta es el tiempo en que se mantengan a bajas temperaturas. La respiración induce la degradación de carbohidratos, proteínas y aceites a productos más simples para liberar energía que se utilizarán en el metabolismo del fruto. La degradación de estas reservas en los frutos acelera la senescencia, ya que proveen la energía para mantener el producto vivo hasta que se agotan (Kader & Yahia, 2011). Las películas microperforadas permiten o fomentan el rápido desarrollo de niveles adecuados de CO₂ y O₂ para prolongar la vida útil del producto. La tasa de intercambio de gas de una película microperforada con una base de barrera de gas se controla por el número y las dimensiones de las perforaciones (Caner et al., 2008). González-Buesa, Ferrer-Mairal, Oria, & Salvador, (2009) mencionan que al alterar el tamaño y la densidad del microperforado, los empaques con tasas de flujo específicas se pueden ajustar para un producto. El tamaño de las perforaciones utilizadas normalmente en empaques con atmósferas modificadas es de entre 50 a 200 µm de diámetro. Por cada 10 °C que aumenta la temperatura de almacenamiento arriba de la temperatura óptima, la tasa de respiración de la fruta aumenta 2 o 3 veces más (Saltveit, 2003).

3.5 Conclusiones

La temperatura de almacenamiento permitió conservar la calidad retrasando el proceso de maduración en frutos de ciruela mexicana cosechados en madurez fisiológica. En frutos almacenados a 14 °C se redujo la pérdida de peso, disminuyó la pérdida de firmeza, se presentó acumulación de SST. Asimismo, la vida de anaquel fue mayor que a temperatura ambiente. El nivel de microperforado afectó en la variable pérdida de peso y firmeza con mayor importancia puesto que los empaques con mayor número de microperforaciones se observó mayor pérdida de peso y firmeza. La velocidad de respiración y producción de etileno se disminuyó en los frutos almacenados a 14 °C.

3.6 Literatura citada

- Alia-Tejacal I., Maldonado-Astudillo, Y. I., Nuñez-Colín C. A., Valdez-Aguilar, L. A., Bautista-Baños, S., García Vázquez, E., Ariza-Flores, R., & Rivera-Cabrera F. (2012). Caracterización de frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) del Sur de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35, 21–26.
- AOAC. 2002. International Methods Committee Guidelines for validation of qualitative and quantitative food microbiological official methods of analysis. AOAC International, Washington DC. USA. 189 p.
- Aghdam, M. S., & Bodbodak, S. (2014). Postharvest Heat Treatment for Mitigation of Chilling Injury in Fruits and Vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 37–53. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1207-4>
- Akbudak, B., Akbudak, N., Seniz, V., & Eris, A. (2007). Sequential Treatments of Hot Water and Modified Atmosphere Packag. *Journal of Food Quality*, 30(2007), 896–910.
- Arenas-Ocampo M. L., Evangelista-Lozano S., Arana-Erasquín R., Jiménez-Aparicio A., & Dávila-Ortíz G. (2003). Softening and biochemical changes of sapote maney fruit (*Pouteria Sapota*) at different development and ripening stages. *Journal of Food Biochemistry*, 27, 91-107.
- Avitia-García, E., Castillo-González, A.M., Pimienta-Barrios, E., 2000. Ciruela mexicana y otras especies del género *Spondias* L. Universidad Autónoma de Chapingo. Primera edición, México, pp. 75.
- Balaguera, Helber Enrique, Álvarez, Javier Giovanni, & Bonilla, Diana Carolina. (2009). CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL FRUTO DE CHAMPA (*Campomanesia lineatifolia* Ruiz & Pavón). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 12(2), 113-123. Retrieved October 16, 2018, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262009000200012&lng=en&tlng=es.
- Banda, K., Caleb, O. J., Jacobs, K., & Opara, U. L. (2015). Effect of active-modified atmosphere packaging on the respiration rate and quality of pomegranate arils (cv. Wonderful). *Postharvest Biology and Technology*, 109, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.06.002>
- Bautista Baños, S., & Hernández López, M., & Guillén Sánchez, D., & Tejacal, I. (2006). Influencia del recubrimiento con quitosano y la temperatura de almacenamiento en la calidad postcosecha y niveles de infección en la ciruela mexicana. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 7 (2), 114-121.
- Beckles, D. M. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.016>

- Cadena Meneses, J., & Castillo Morales, A. (2002). Comparación de diferentes métodos para la estimación de componentes de varianza . *Agrociencia*, 36 (6), 713-723.
- Castellanos, D. A., Polanía, W., & Herrera, A. O. (2016). Development of an equilibrium modified atmosphere packaging (EMAP) for feijoa fruits and modeling firmness and color evolution. *Postharvest Biology and Technology*, 120, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.06.012>
- Cruz-León, A. Pita-Duque, A. Rodríguez- Haros, B. (2012). Jocates, Jobos, Abales o ciruelas mexicanas. Chapingo México. Centros Regionales Universidad Autónoma Chapingo.
- Del Pilar Pinzón, I., Fischer, G., & Corredor, G. (2007). Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa. *Agronomía Colombiana*, 1(25), 83–95. <https://doi.org/690-2>
- Del Rocío Ruenes-Morales, M., Casas, A., Jiménez- Osornio, J. J., & Caballero, J. (2010). Etnobotánica de *Spondias purpurea* L. (anacardiaceae) en la península de Yucatán. *Interciencia*, 35(4), 247–254.
- Gallo, F. (1996.) Manual de fisiología, patología post-cosecha y control de calidad de frutas y hortalizas. Convenio SENA - NRI, Armenia. pp. 10-41.
- García-González, M., Alia-tejacal, I., Rivera-cabrera, F., León-sánchez, F. D. De, López-martínez, V., Pérez-flores, L. J., & Pelayo-zaldivar, C. (2016). Refrigeración de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L .) ' Cuernavaqueña ', *Acta agrícola y pecuaria*, 2(2), 27–33.
- García M., M.C., Peña, A.C., & Brito Grandes, B. (2014). Desarrollo tecnológico para el fortalecimiento del manejo poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). En C. P. Pássaro Carvalho, y D. Moreno (Eds.), *Physalis peruviana* L.: Fruta andina para el mundo. 79-111 Murcia, España: CYTED/CORPOICA/INIAP.
- García Tain, Yelene, Pérez Padrón, Jesús, García Pereira, Annia, & Hernández Gómez, Antihus. (2011). Determination of pineapple (*Ananas Comosus*) quality properties Cayena Lisa variety stored under environmental conditions. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1), 62-65. Recuperado en 05 de octubre de 2018, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000100011&lng=es&tlng=en.
- Gwanpua, S. G., Verlinden, B. E., Hertog, M. L. A. T. M., Bulens, I., Van de Poel, B., Van Impe, J., ... Geeraerd, A. H. (2012). Kinetic modeling of firmness breakdown in “Braeburn” apples stored under different controlled atmosphere conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 67, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.12.010>

- Kader, A. (2007). Atmósferas modificadas en el transporte y el almacenamiento. *Pelayo-Zaldívar (Coord.). Tecnología Postcosecha de Cultivos Hortofrutícolas...*, 2, 157–168.
- Kader, A. a. (2002). Biología y Tecnología Postcosecha: un Panorama. *Tecnología Postcosecha de Cultivos Hortofrutícolas*, 584.
- Kays, S. 2004. Postharvest biology. Exon Press, Athens, Georgia. 568 p.
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Navarrete-García, H. A., Ortiz-Morales, Ó. D., Jiménez-Hernández, J., Salazar-López, R., Alia-Tejacal, I., & Álvarez-Fitz, P. (2016). Physical, chemical and antioxidant properties of mango varieties grown at the Guerrero coast . *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(3), 207–214. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0.84995554279&partnerID=40&md5=0bcef0dce40060a88ead51ab99ddb32>
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Alia-Tejacal, I., Núñez-Colín, C. A., Jiménez-Hernández, J., Pelayo-Zaldívar, C., López-Martínez, V., ... Valle-Guadarrama, S. (2014). Postharvest physiology and technology of *Spondias purpurea* L. and *S. mombin* L. *Scientia Horticulturae*, 174(1), 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.016>
- Martins, Laesio Pereira, Silva, Silvanda de Melo, Alves, Ricardo Elesbão, & Filgueiras, Heloísa Almeida Cunha. (2003). Fisiologia do dano pelo frio em ciriguela (*Spondias purpurea* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(1), 23-26. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452003000100008>
- Milanez, J. T., Neves, L. C., Colombo, R. C., Shahab, M., & Roberto, S. R. (2018). Bioactive compounds and antioxidant activity of buriti fruits, during the postharvest, harvested at different ripening stages. *Scientia Horticulturae*, 227(December 2016), 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.045>
- Miller, A., & Schaal, B. (2005). Domestication of a Mesoamerican cultivated fruit tree, *Spondias purpurea*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(36), 12801–12806. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505447102>
- Osterloh, A., G. Ebert, W.H. Held, H. Schulz y E. Urban. 1996. Lagerung von Obst und Südfrüchten. Verlag Ulmer, Stuttgart. 253 p
- Parra C, A., & Fischer, G. (2013). Maduración y comportamiento poscosecha de la feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(1), 98–110. <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i1.2039>
- Pérez-Arias, G. A., Alia-Tejacal, I., Andrade-Rodríguez, M., López-Martínez, V., Pérez-López, A., Ariza-Flores, R., ... Villarreal-Fuentes, J. M. (2008). Características físicas y químicas de ciruelas mexicanas (*Spondias purpurea*) en Guerrero. *Producción Agrícola*, 5(2), 141–149.

- Pérez López, A., & Saucedo Veloz, C., & Arévalo Galarza, M., & Muratalla Lúa, A. (2004). Efecto del grado de madurez en la calidad y vida postcosecha de ciruela mexicana (*spondias purpurea* L.) . *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27 (2), 133-139.
- Ramírez Hernández, B. C., Barrios Eulogio, P., Castellanos Ramos, J. Z., Muñoz Urias, A., Palomino Hasbach, G., & Pimienta Barrios, E. (2008). Sistemas de producción de *Spondias purpurea* (Anacardiaceae) en el centro-occidente de México. *Revista de Biología Tropical*, 56(2), 675–687.
- Ramos-Ramírez, F. X., Alia-Tejacal, I., López-Martínez, V., Colinas-León, M. T., Acosta-Durán, C. M., Tapia-Delgado, A., & Villegas-Torres, O.. (2009). Almacenamiento de frutos de zapote mamey [*Pouteria sapota* (Jacq.) H. E. Moore & Stearn] en atmósfera modificada. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(1), 17-23. Recuperado en 16 de octubre de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2009000100004&lng=es&tlng=es.
- Reid, M. S. (2007). Maduración e Índices de Madurez. *Tecnología Postcosecha de Cultivos Hortofrutícolas*, 63–71.
- Romojaro, F. Riquelme, F. Pretel, M. T. Martínez, G. Serrano, M. Martínez, C. Lozano, P. Segura, P. & Luna, P. A. (1996). Nuevas tecnologías de conservación de frutas y hortalizas: atmósferas modificadas. Mundi prensa. Madrid, Barcelona. México. pp. 217.
- Saini, R. K., Nile, S. H., & Park, S. W. (2015). Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry , analysis , occurrence , bioavailability and biological activities. *FRIN*, 76, 735–750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.047>
- Selcuk, N., & Erkan, M. (2015). The effects of modified and palliflex controlled atmosphere storage on postharvest quality and composition of “Istanbul” medlar fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 99, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.07.004>
- Sousa-Gallagher, M. J., Mahajan, P. V., & Mezdad, T. (2013). Engineering packaging design accounting for transpiration rate: Model development and validation with strawberries. *Journal of Food Engineering*, 119(2), 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.041>
- Wills, R., B. McGlasson, D. Graham & D. Joyce. 1998. Postharvest: an introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals. CAB International, Nueva York. 262 p.

4 CONTENIDO DE COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN FRUTOS DE CIRUELA MEXICANA (*Spondias purpurea* L.) EN ATMÓSFERAS MODIFICADAS*

Resumen

Conservar la capacidad antioxidante en los frutos es importante por los beneficios que confieren a la salud humana, es por ello que el principal objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento de los compuestos antioxidantes en frutos de ciruela mexicana almacenados en dos temperaturas (14 y 25 °C) en atmósfera modificada con diferentes niveles de microperforado (0, 3, 6, 10). Los frutos de la especie *Spondias purpurea* ecotipo cuernavaqueña se cosecharon en madurez fisiológica (verdes) en época húmeda. Durante el tiempo de almacenamiento se evaluó el contenido de fenoles, flavonoides, actividad antioxidante, clorofilas, y carotenoides en pulpa y epicarpio. Se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias por el método de Tukey-Kramer ($P \leq 0.05$). De acuerdo a los resultados, todos los frutos sin importar condiciones de almacenamiento sufrieron cambios como consecuencia del proceso de maduración. En el caso de los carotenoides fue posible observar que conforme transcurrió el tiempo la concentración aumentó en el tratamiento M10-T25, debido a que hubo mayor intercambio del aire dentro del empaque por el número de microperforaciones. Con relación a fenoles, flavonoides y actividad antioxidante sus concentraciones no se vieron afectadas por el estado de madurez puesto que no se observó mucha variación al final del almacenamiento con respecto al primer día de la evaluación. Estos resultados indican que estas condiciones de almacenamiento mantienen las propiedades nutraceuticas.

Palabras clave: compuestos antioxidantes, flavonoides, actividad antioxidante

*Tesis: Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ing. Adriana Herrero Galindo
Director (a): Dra. Ma. Teresa Beryl Colinas León

CONTENT OF ANTIOXIDANT COMPOUNDS IN MEXICAN PLUM FRUITS (*Spondias purpurea*) IN MODIFIED ATMOSPHERES*

Abstract

Preserving antioxidant capacity in fruits is important because of the benefits they confer on human health, which is why the main objective of this research was to evaluate the behavior of phenolic compounds in Mexican plum fruits stored at two temperatures (14 and 25 °C) in a modified atmosphere with different levels of microperforation (0, 3, 6, 10). The fruits of the *Spondias purpurea* ecotype Cuernavaqueña species were harvested at physiological maturity (changing greens) in the wet season. During the storage time the content of phenols, flavonoids, antioxidant activity, chlorophylls, and carotenoids in pulp and epicarp were evaluated. An analysis of variance and a comparison of means were performed by the Tukey-Kramer method ($P \leq 0.05$). According to the results, all the fruits, regardless of storage conditions, suffered changes as a consequence of the ripening process. In the case of carotenoids it was possible to observe that as time passed the concentration increased in the M10-T25 treatment, due to the fact that there was greater air exchange within the package due to the number of microperforations. In relation to phenols, flavonoids and antioxidant activity, their concentrations were not affected by the state of maturity since there was not much variation at the end of storage with respect to the first day of the evaluation. These results indicate that these storage conditions maintain the phytochemical properties of the fruit, in addition it is possible to delay the ripening process at low temperature (14 °C).

Keywords: antioxidant compounds, flavonoids, antioxidant activity

* Thesis: Universidad Autónoma Chapingo
Author: Ing. Adriana Herrero Galindo
Advisor: Dra. Ma. Teresa Beryl Colinas León

4.1 Introducción

El creciente interés por el estudio de fenoles, flavonoides, taninos y antocianinas entre otros, ampliamente distribuidos en las plantas, se debe a la alta actividad antioxidante que exhiben (Hotta, Sakamoto, Nagano, Osakai, & Tsujino, 2001). Asimismo, los compuestos fenólicos también son relevantes en términos de sabor en los alimentos, ya que pueden contribuir en el sabor amargo, dulce o astringente de algunos productos y también pueden ser parte del aroma (Tomás-Barberán & Espín, 2001).

El contenido de compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides y la actividad antioxidante varía entre cultivares, estados de madurez, y condiciones edafo-climáticas (Li et al., 2014). Belitz et al. (2009) mencionan que la cantidad de compuestos fenólicos está fuertemente asociada al estado de maduración del fruto, clima, composición del suelo, variedad y ubicación geográfica, entre otros factores. El manejo de frutos desde cosecha, transporte y almacenamiento puede tener un impacto importante en el contenido de compuestos fenólicos y enzimas involucradas en el metabolismo fenólico conduciendo a cambios en la calidad (Tomás-Barberán & Espín, 2001).

El almacenamiento a bajas temperaturas puede tener efectos positivos y negativos, en los fenoles y en la calidad de frutos dependiendo del producto y la temperatura de almacenamiento. Las atmósferas modificadas y controladas generalmente disminuyen el contenido de O_2 e incrementan el CO_2 de la atmósfera circundante del producto, puede producir efectos directos en el metabolismo y en consecuencia en la composición fenólica del fruto (Tomás-Barberán & Espín, 2001).

El almacenamiento refrigerado de frutos puede ser combinado con una atmósfera modificada para alargar la vida de anaquel. El uso de atmósferas con una reducción del O_2 y un incremento del CO_2 han demostrado ser útiles para disminuir la tasa de respiración y descomposición del producto. El incremento de CO_2 puede tener efectos marcados en los metabolitos y en la calidad del fruto ya

que puede disminuir la pigmentación en frutas e inducir al oscurecimiento, en algunos casos (Tomás-Barberán & Espín, 2001). Por otro lado, Gautam et al. (2017) explican que el uso de recubrimientos poliméricos es un método simple y de bajo costo que se utiliza para alargar la vida útil del producto. La efectividad de las atmósferas modificadas depende principalmente de la temperatura utilizada y de la actividad fisiológica del producto.

Muchos estudios se han realizado para determinar los efectos de compuestos bioactivos principalmente en aquellas frutas o vegetales de gran demanda (Álvarez-Vargas et al., 2017). Sin embargo, frutos como la ciruela mexicana son de interés en algunas regiones de México, por lo tanto, es necesario cuantificar la concentración de compuestos antioxidantes. Se ha reportado compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides y actividad antioxidante están naturalmente presentes en frutos de ciruela mexicana, aunque su concentración varía de acuerdo al estado de maduración (Suárez-Vargas et al., 2017; Álvarez-Vargas et al., 2017), lo que coincide con lo reportado por Gayosso-García, Yahia y González-Aguilar (2011) indican que los compuestos antioxidantes dependen del estado de maduración, prácticas culturales y de procesamiento.

Estos compuestos se ven afectados por algunos factores que alteran su concentración, su biodisponibilidad y por lo tanto la actividad biológica ya que depende principalmente de la estructura química (Tomás-Barberán & Espín, 2001). Así mismo, es necesario conocer el efecto de la temperatura en los frutos, que permitan prolongar la vida de anaquel sin alterar el contenido de estos compuestos ya que son altamente inestables por diversos factores. Por lo cual el objetivo fue evaluar el efecto de las atmósferas modificadas con diferentes niveles de microperforado en la concentración de compuestos antioxidantes durante el periodo de almacenamiento de frutos de ciruela mexicana a 14 y 25 °C.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Material vegetal

Se cosecharon frutos de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) en madurez fisiológica (verdes) conocida como cuernavaqueña. La recolecta se realizó en el Municipio de Atlatahuacán, Morelos en octubre del 2017. Se utilizó como índice de cosecha el color y se seleccionaron de tamaño homogéneo, así como libres de daños físicos y patógenos.

4.2.2 Diseño experimental

Los frutos se colocaron en bolsas de polietileno de baja densidad, con diferentes niveles de microperforado (0, 3, 6 y 10), los cuales se combinaron con dos niveles de temperatura generando ocho tratamientos los cuales quedaron conformados como se muestran en el Cuadro 3. La unidad experimental se conformó de seis frutos y se realizaron tres repeticiones. Los tratamientos ensayados se evaluaron durante el periodo de almacenamiento mediante la medición de las variables respuesta a intervalos de 48 h. Las variables medidas fueron compuestos fenólicos, flavonoides, actividad antioxidante, clorofilas totales, carotenoides totales en pulpa y epicarpio.

4.2.3 Preparación de extractos

Para la cuantificación del contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante se preparó el extracto metanólico (80 % v:v) de frutos de ciruela mexicana de cada tratamiento por el método descrito por Chan et al. (2002). Se pesó 1 g de pulpa y se homogeneizó con 10 mL de metanol durante 15 segundo. El extracto se agitó en un vortex después se colocó en sonicación por 15 min y se dejó reposar por 24 h bajo refrigeración (8 °C), posteriormente se centrifugó a 600 X g por 10 min y finalmente se aforó a 10 mL.

4.2.4 Determinación de compuestos fenólicos

La concentración de compuestos fenólicos se determinó por el método Folin-Ciocalteu de acuerdo al método propuesto por Waterman y Mole (1994). A 0.5 mL del extracto metanólico se le adicionaron 0.5 mL del reactivo Folin-Ciocalteu (0.2N), 4 mL de una solución de Na_2CO_3 a 0.7 M, se dejó reposar por dos horas en obscuridad a temperatura ambiente. Finalmente, se midió la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro Genesys 10s (Thermoscientific, Florida, USA). La concentración se calculó a partir de una curva estándar preparada a base de ácido gálico y el contenido de compuestos fenólicos se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso fresco (mg EAG 100 g⁻¹ p.f.).

4.2.5 Cuantificación de flavonoides

El contenido de flavonoides se cuantificó de acuerdo al método propuesto por (Chang, Yang, & Wen, 2002). A 0.5 mL del extracto metanólico preparado anteriormente, se le agregaron 1.5 mL de etanol al 95 % v/v, 0.1 mL de solución de AlCl_3 al 10 % p/v, 0.1 mL de solución 1 M de acetato de potasio (CH_3COOK) y 2.8 mL de agua destilada. La mezcla se incubó por 30 min. Se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro Genesys 10s (Thermoscientific, Florida, USA) a una longitud de onda 415 nm. Se realizó una curva estándar a base de flavonol quercetina, los resultados se reportaron en mg equivalentes de quercetina por 100 g de peso fresco (mg EQ 100 g⁻¹ p.f.).

4.2.6 Carotenoides totales

Los carotenoides totales fueron determinados de acuerdo al método propuesto por Speek et al. (1998). Se pesaron 2 g de pulpa y se agregaron 10 mL de n-hexano/acetona/etanol (50/25/25 v/v). La solución se mantuvo en obscuridad a temperatura ambiente durante una hora. Posteriormente, fue centrifugada a 1000 X g por 5 min. La fase orgánica se aforó a 25 mL con hexano. Una alícuota de 3 mL fue usada para medir la absorbancia a una longitud de onda de 450 nm en un espectrofotómetro Genesys 10s (Thermoscientific, Florida, USA). La

concentración se calculó mediante el empleo del coeficiente de extinción de β -caroteno, $\epsilon=2505$ como estándar y los resultados se reportaron en $\mu\text{g g}^{-1}$ de fruto fresco de pulpa de acuerdo a las siguientes ecuaciones (4) y (5):

$$\mu\text{g} = \frac{A^*V(\text{mL})10^6}{A_{1\text{cm}}^{1\%} 100} \quad (3)$$

$$\mu\text{g g}^{-1} = \frac{(\mu\text{g})}{\text{g muestra}} \quad (4)$$

donde: A^* es la absorbancia, V es el volumen de la muestra y $A_{1\text{cm}}^{1\%}$ es el coeficiente de absorción específico de β -caroteno.

Para el análisis de los datos se utilizó el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1999) bajo la asignación de un modelo mixto y un análisis de varianza, así como la comparación de medias con una prueba de Tukey-Kramer ($P \leq 0.05$).

El modelo mixto se expresa en la Ecuación (3) (Cadena y Castillo, 2002):

$$Y = X\beta + U\xi + \varepsilon \quad (5)$$

Y = es un vector ($n \times 1$) de observaciones.

β = es un vector ($s \times 1$) de parámetros desconocidos de efectos fijos.

X = es una matriz ($n \times s$) conocida, usualmente denominada matriz diseño de efectos fijos.

ξ = es un vector ($t \times 1$) de efectos aleatorios, es de la forma $\xi' = [\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_c]$ con ξ_i de orden t_i y $t_1 + t_2 + \dots + t_c = t$ y $\xi' = (0, \sigma_e^2 I_n)$ con $\text{cov}(\xi_i, \xi_{i'}) = 0$ para $i \neq i'$.

$U = [U_1, U_2, \dots, U_c]$ Es una matriz ($n \times t$) de incidencias, conocida, con U_i de dimensiones $n \times t_i$, denominada matriz diseño de efectos aleatorios para estudios longitudinales.

$\varepsilon \sim (0, \sigma_e^2 I_n)$ es el vector ($n \times 1$) de términos de error aleatorios.

4.2.7 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó de acuerdo al método descrito por Re et al. (1999). Para determinar la actividad antioxidante en la muestra, primero se generó el radical libre $ABTS^{+}$ (Ácido 2,2'-azino-bis (3-etilben-zotiazolin)-6-sulfónico), a 10 mL de una solución 7 mM de ABTS, se le agregaron 6.61 mg de $K_2S_2O_8$, mezcla se dejó reposar a temperatura ambiente en oscuridad durante 16 h, a 1 mL de la solución de $ABTS^{+}$ se le agregó el volumen necesario de etanol anhidro hasta lograr obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.1 (máxima concentración de radical $ABTS^{+}$ formado) medida en un espectrofotómetro Genesys 10s (Thermoscientific, Florida, USA) a una longitud de onda de 734 nm.

Para determinar la actividad antioxidante en la muestra, a 1 mL de la solución 7 mM de radical libre de $ABTS^{+}$ se le adicionaron 10 μ L del extracto metanólico de la muestra, la mezcla se incubó a baño maría a 30 °C en oscuridad por 7 min. Posteriormente, se midió la absorbancia de la muestra en un espectrofotómetro Genesys 10s (Thermoscientific, Florida, USA) a una longitud de onda de 734 nm. Para la cuantificación de la actividad antioxidante se realizó una curva estándar a base de la trolox (Ácido 6-hidroxi-2, 5, 7, 8-tetrametilcroman-2-carboxílico). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de trolox por cada 100 g de peso fresco (mg ET 100 g⁻¹ p.f.).

4.2.8 Clorofilas totales

El contenido de clorofilas totales se determinó de acuerdo al método propuesto por Lichtenthaler (1987), se pesó 1 g de epicarpio finamente picado de cada tratamiento, se homogeneizó en 10 mL de acetona al 80 % durante 15 s y se filtró. Posteriormente, se midió la absorbancia a tres longitudes de onda (445, 663 y 645 nm) en un espectrofotómetro UV-VIS Genesys 10. Se emplearon las ecuaciones (6)-(9) para el cálculo de clorofilas totales.

$$Cl\ a\ (\mu g\ mL^{-1}) = 12.25A_{663} - 2.79A_{645} \quad (6)$$

$$Cl\ b\ (\mu g\ mL^{-1}) = 21.50A_{645} - 5.10A_{663} \quad (7)$$

$$Cl_{\text{totales}}(\mu\text{g mL}^{-1}) = 6.83A_{663} + 18.27A_{645} \quad (8)$$

$$C_{x+c}(\mu\text{g mL}^{-1}) = (1000A_{470} - 1.82c_a - 85.02c_b)/198 \quad (9)$$

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Compuestos fenólicos

La Figura 17 muestra el comportamiento del contenido de compuestos fenólicos en frutos de ciruela mexicana sujeta del efecto de los ocho tratamientos durante los ocho días del almacenamiento. Dado que los frutos se cosecharon en madurez fisiológica, de acuerdo lo reportado por Suárez-Vargas et al. (2017) el contenido de compuestos fenólicos incremento a los diferentes estados de maduración, donde la concentración más baja fue en frutos verdes y la más alta en frutos cosechados en madurez comercial, por lo que se esperaba que el contenido de compuestos fenólicos aumentara conforme avanzaba a su madurez comercial, sin embargo, se observaron fluctuaciones en el contenido a través del tiempo sin una tendencia definida.

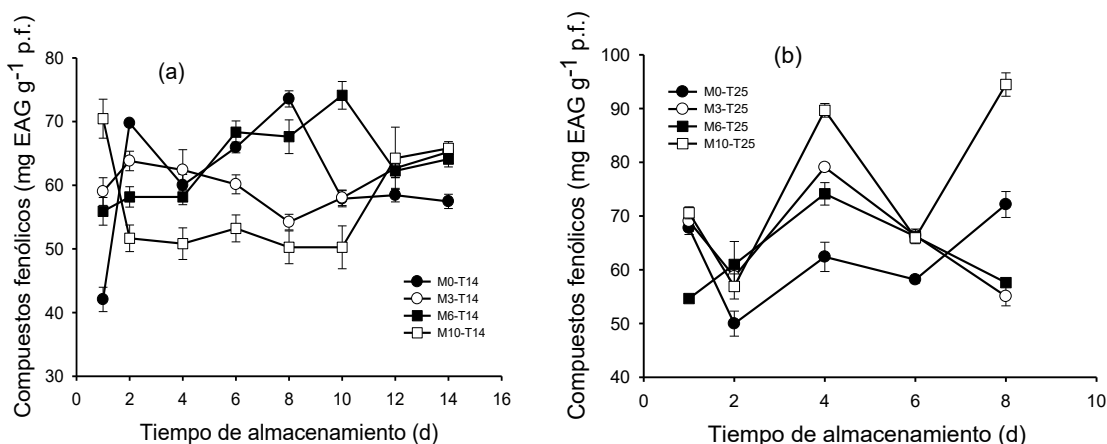


Figura 17. Comportamiento de compuestos fenólicos en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Fenoles de frutos almacenados a 14 °C, (b) Fenoles de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

La Figura 18 muestra el contenido de fenoles al octavo día de almacenamiento. La interacción microperforado temperatura fue significativa ($P \leq 0.05$). Se observa que el efecto del tratamiento M0-T25 fue significativamente superior a los demás tratamientos en la producción de estos metabolitos (90.23 mg EAG 100 g⁻¹ p.f.).

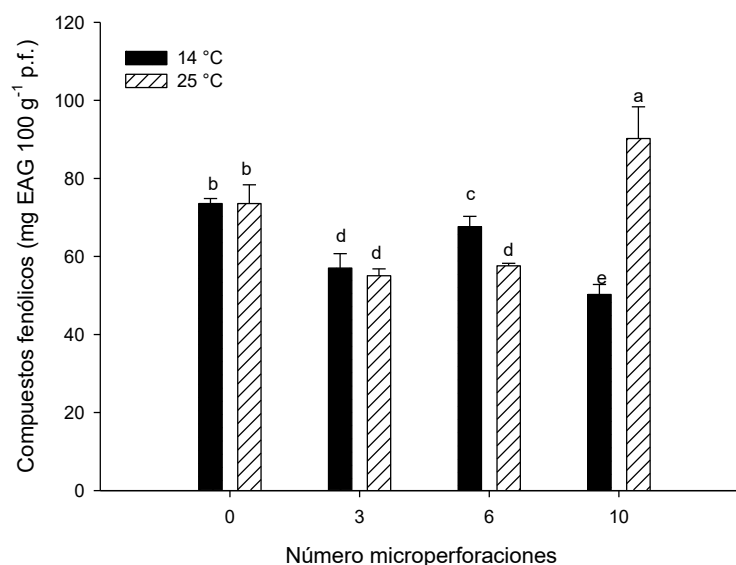


Figura 18. Fenoles totales al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.

Filgueiras et al. (2001) mencionaron que durante el almacenamiento y la maduración poscosecha en frutos de ciruela mexicana (*S. purpurea*) no se observó un patrón definido de la variación en el contenido de compuestos fenólicos, ni cambios significativos en ningún estado de maduración. Suárez-Vargas et al. (2017) observaron que el contenido de compuestos fenólicos varió de acuerdo al estado de maduración, registrando la concentración más alta en frutos con 50 % de coloración (89.21 mg EAG 100 g⁻¹ p.f.) y 77.7 mg EAG 100 g⁻¹ p.f. en frutos con 75 % de coloración, en cambio los frutos cosechados completamente verdes presentaron valores de 48.71 y 48.1 mg EAG 100 g⁻¹ p.f..

Estos resultados son similares a lo registrado en la presente investigación. Los autores mencionan que la concentración de estos metabolitos va a depender de la etapa de maduración en que sean analizados. Lima et al. (2007) sugieren que el aumento o disminución de los compuestos fenólicos puede estar relacionado con una serie de eventos genéticos correlacionados con un sistema complejo de maduración. Milanez et al. (2018), evaluaron el contenido de compuestos fenólicos en frutos en tres estados de maduración y los valores más altos se obtuvieron en frutos cosechados en madurez comercial.

Haminiuk, Maciel, Plata-Oviedo, y Peralta, (2012) mencionan que el perfil fenólico de los frutos puede variar en relación a los factores como el genotipo, las condiciones de crecimiento las técnicas de manejo, la ubicación del huerto y el estado de madurez. Por otro lado, la ciruela mexicana es un fruto con una gran variedad de ecotipos, lo que explica la diversidad de resultados hasta ahora reportados sobre el contenido de compuestos fenólicos de las principales especies que se encuentran en México.

4.3.2 Flavonoides

En general la concentración de flavonoides en pulpa durante el periodo de almacenamiento no mostró incremento, únicamente en el cuarto día en los tratamientos M3-T14 y M6-T14 se registraron los valores más altos (Figura 19). Al tratamiento con mayor estabilidad en la concentración de estos metabolitos durante el tiempo de almacenamiento fue el M3-T25. La interacción temperatura-tiempo al día ocho fue significativa ($P \leq 0.05$) y la interacción microperforado-tiempo no afectó significativamente. Al final del almacenamiento en las bolsas sin perforaciones y en las bolsas con 6 y diez perforaciones se obtuvieron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) a diferentes temperaturas en el mismo nivel de microperforado (Figura 20). Dumas, Dadomo, Di Lucca, & Grolier, (2003) indicaron que temperaturas bajas, (5 y 10 °C) inducen la acumulación de flavonoides en las plantas.

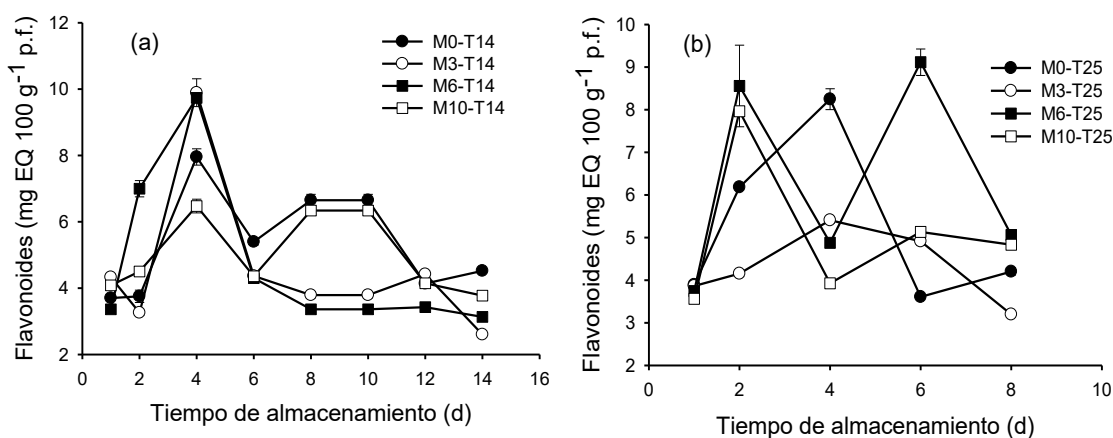


Figura 19. Comportamiento de los flavonoides en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Flavonoides de frutos almacenados a 14°C , (b) Flavonoides de frutos almacenados a 25°C . Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

Suárez-Vargas et al. (2017) reportan valores superiores en pulpa en frutos de ciruela mexicana en diferentes etapas de maduración el valor más alto en frutos con 75 % de coloración ($23.26 \text{ mg EQ } 100 \text{ g}^{-1}$). A diferencia con lo reportado por Villa et al. (2017) donde la concentración de flavonoides fue baja en todos los ecotipos analizados, sobresaliendo los ecotipos Conservera de Tlaxmalac, Morada de Cocula y Costeña Tierra Colorada con los siguientes valores (4.7 , 4.5 y $4.5 \mu\text{g EQ g p.f.}$), mientras que en pulpa se detectó únicamente en el ecotipo Costeña tierra colorada ($0.4 \pm 1 \mu\text{g EQ g}^{-1} \text{ p.f.}$) por lo que concluyen que estos ecotipos no contribuyen a la capacidad antioxidante.

Olsen et al. (2009) reportan que uno de los mayores controles de ambientales en la producción de flavonoides es la luz, donde la intensidad de la luz, la calidad de la luz y el fotoperiodo contribuyen a los efectos generales. Estos compuestos se acumulan por la luz y se degradan en oscuridad. Los flavonoides que más se han encontrado tanto en la epidermis como en la pulpa son el kaempferol y naringenina (Moco et al., 2007).

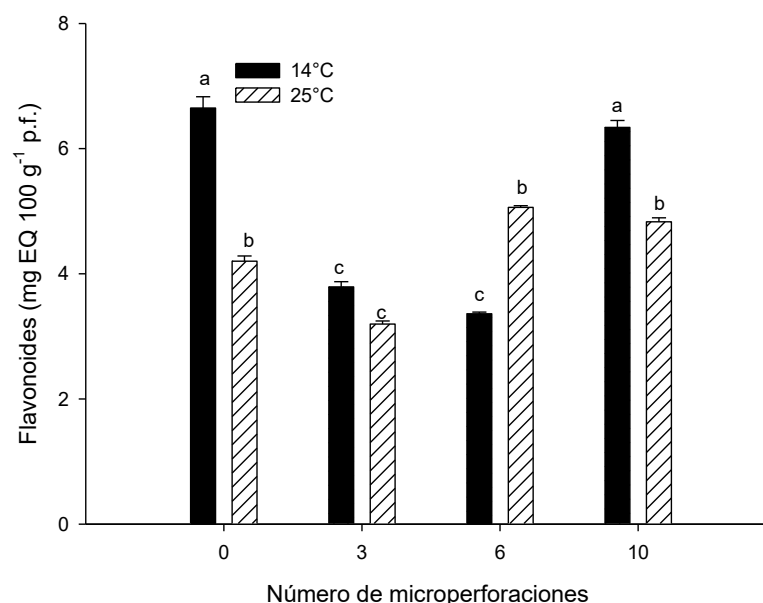


Figura 20. Flavonoides al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14°C y 25°C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.

4.3.3 Carotenoides en pulpa

En la Figura 21 se observa variación de la concentración de carotenoides totales en pulpa de frutos de ciruela mexicana durante el periodo de almacenamiento. Los factores temperatura, tiempo y microperforado afectaron significativamente ($P \leq 0.05$) el contenido de estos metabolitos. Al octavo día los tratamientos, M3, M6 y M10-T25 mostraron la concentración más alta con respecto a los de 14°C , debido a que alcanzaron su madurez comercial en este periodo, en cambio la temperatura a 14°C retrasó el proceso de maduración (Figura 22). En los tratamientos M0-T14 y M0-T25 no fue posible un desarrollo homogéneo del color, es por ello que su concentración fue baja. El tratamiento M10-T25 registró la concentración más alta ($13 \mu\text{g g}^{-1}$) de todos los tratamientos.

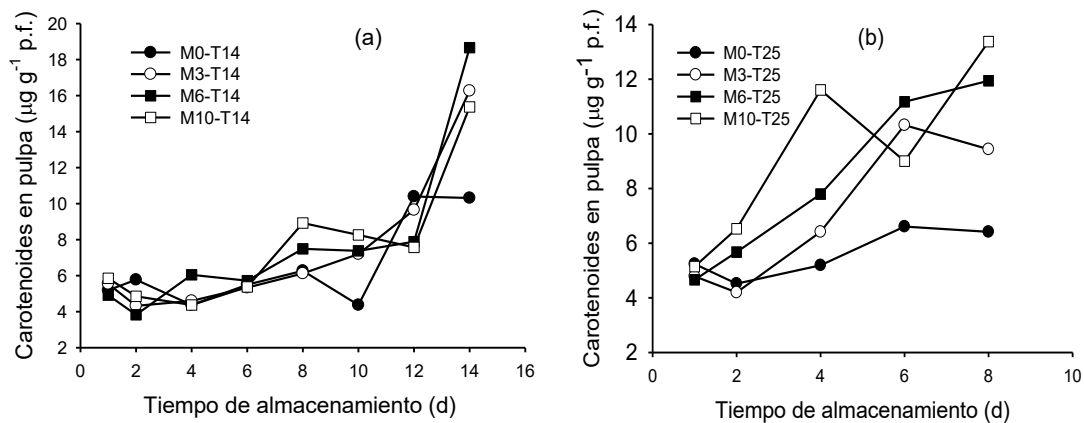


Figura 21. Comportamiento de los carotenoides en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Carotenoides de frutos almacenados a 14 °C, (b) Carotenoides de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones en el empaque: M0, M3, M6 y M10.

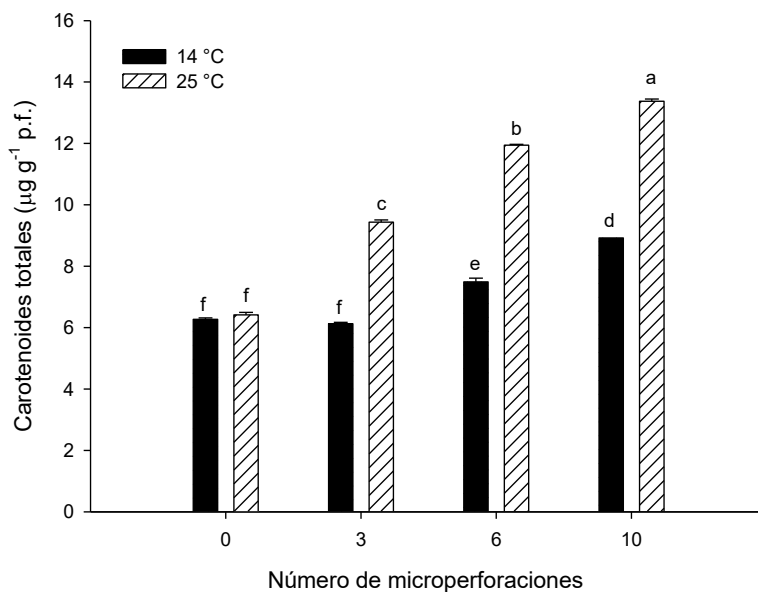


Figura 22. Carotenoides totales en pulpa al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.

Solorzano-Morán et al. (2015) evalúan el contenido de carotenoides en 11 ecotipos en pulpa y epicarpio. En pulpa el valor más alto es de 2.8 mg 100 g⁻¹ p.f. y el más bajo (0.5 mg 100 g⁻¹ p.f.), mientras que la concentración en el epicarpio fue mayor, el ecotipo morada presentó el valor más alto (27.3 mg 100 g⁻¹ p.f.) y el más bajo se observó en el ecotipo venado (6.61 mg 100 g⁻¹ p.f.). Suárez-Vargas et al. (2017) reportan en pulpa y en epicarpio valores superiores a los encontrados. 150.71 µg g⁻¹ en pulpa y 853.6 µg g⁻¹ en epicarpio en frutos cosechados en madurez comercial, en ambos casos la concentración aumenta de acuerdo a la etapa de maduración. Álvarez-Vargas et al. (2017) reportan valores similares en 102 colectas realizadas de la época seca (197.84 µg g⁻¹ p.f.) y húmeda (674.34 µg g⁻¹ p.f.) en frutos cosechados en madurez comercial.

Villa et al. (2017) analizan el contenido de carotenoides en pulpa y epicarpio en ciruela mexicana (*S. purpurea*) donde encuentran que la concentración más alta es en el epicarpio en todos los ecotipos analizados, por otra lado, los autores reportaron que los carotenoides presentes en estos frutos son luteínas y β-caroteno siendo este último el más abundante tanto en epicarpio como en pulpa.

Hernández, Hellin, Fenoll y Flores (2015) reportaron que las condiciones climáticas, las ubicaciones de crecimiento también influyen significativamente en el contenido de carotenoides en plantas. Cândido, Silva, y Agostini-Costa, (2015) evalúan el contenido de carotenoides en tomate en dos condiciones distintas y encuentran que la región que se caracteriza por presentar altas temperaturas mostró un contenido significativamente alto (52.86 mg/ 100 g) y contenido más bajo (31.13 mg / 100 g) en la otra región. Lo que sugiere que los frutos expuestos a altas temperaturas y una mayor incidencia de luz pueden mejorar la biosíntesis de carotenoides, para proteger a la planta de la fotooxidación.

4.3.4 Carotenoides en epicarpio

En el análisis realizado se observó un incremento en la acumulación de carotenoides en el epicarpio durante el tiempo de almacenamiento en todos los tratamientos y en mayor concentración en los almacenados a 25 °C (Figura 23).

Este comportamiento se esperaba desde el momento en que los cambios de color de verde a naranja se retrasaron en los tratamientos a 14 °C, los pigmentos carotenoides son responsables de generar los cambios de color durante la maduración de los frutos (Figura 24).

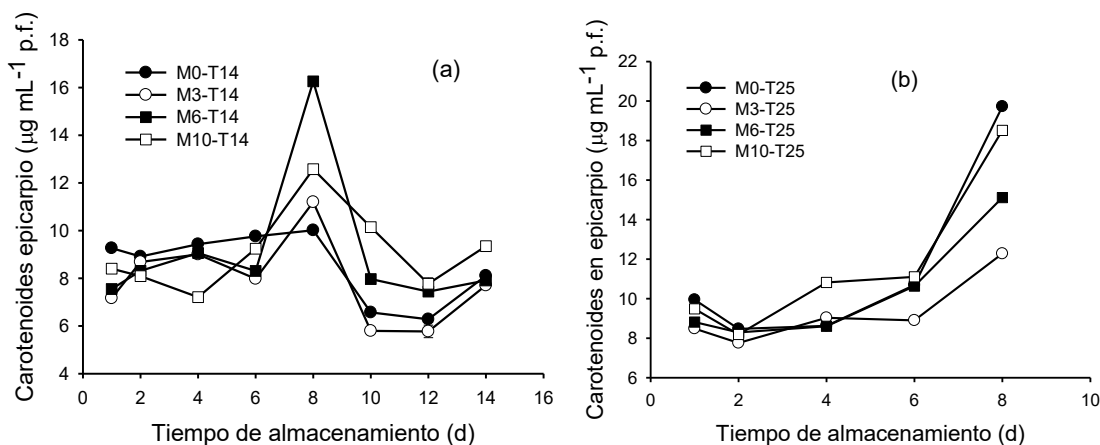


Figura 23. Comportamiento de los carotenoides en epicarpio en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Carotenoides de frutos almacenados a 14 °C, (b) Carotenoides de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10.

En el proceso de maduración se llevan a cabo alteraciones metabólicas que inducen a cambios en los contenidos de clorofila y carotenoides, donde, tanto en la epidermis como en la pulpa las clorofilas son degradadas y se desencadena el proceso de carotenogénesis, que consiste en incrementar el contenido de carotenoides (Solovchenko, Chivkunova, Merzlyak, & Gudkovsky, 2005). Este comportamiento coincide con Mohyeldin, Garzón-Muvdi, y Quiñones-Hinojosa, (2010) quienes explican que la maduración del fruto a menudo va acompañada de un aumento en el contenido de carotenoides. El color de la epidermis en *S. purpurea* está estrechamente relacionado con el metabolismo de los pigmentos carotenoides (amarillo-rojo), polifenoles (rojo-azul) y clorofila (verde), que a su vez, le confieren propiedades antioxidantes al fruto (Silvia et al., 2012). Maldonado-Astudillo et al. (2016) menciona que los cambios en la coloración

externa en los frutos es una característica del proceso de maduración y es uno de los principales atributos en la selección del fruto durante la cosecha.

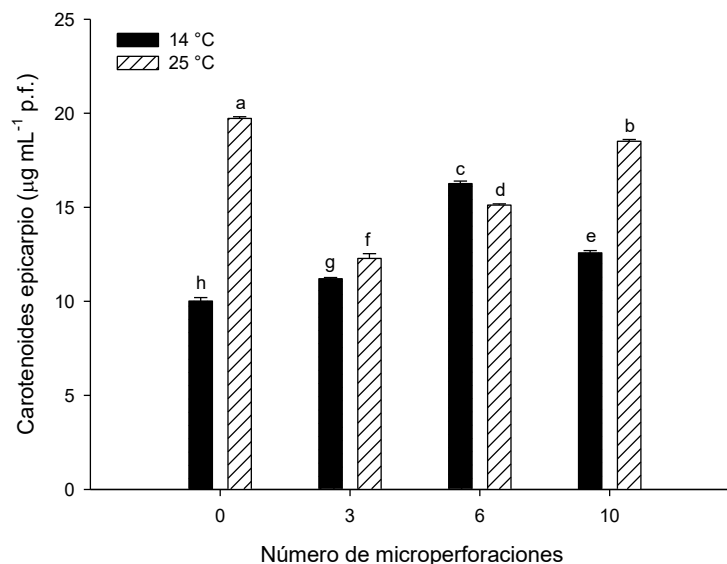


Figura 24. Carotenoides en el epicarpio al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.

El contenido y tipo de carotenoides de plantas depende de varios factores pre y poscosecha, genotipo, tiempo de maduración, método de cultivo y condiciones de climáticas (Saini et al., 2015). Estos autores sugieren que las frutas expuestas a altas temperaturas y una mayor incidencia de luz solar pueden mejorar la biosíntesis de carotenoides, para proteger a la planta de la fotooxidación.

4.3.5 Actividad antioxidante

Durante el tiempo de almacenamiento, la actividad antioxidante de frutos de ciruela mexicana en todos los tratamientos fue baja. Asimismo, no se observó un incremento, sino que fluctuó su actividad durante el almacenamiento (Figura 25).

En cuanto a la interacción temperatura-tiempo al final de la evaluación se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$), principalmente en el tratamiento M10-T25, en este la actividad antioxidante fue estadísticamente superior a los tratamientos almacenados a 25 °C (Figura 26). Con respecto a trabajos realizados en esta especie se encontró que la concentración en esta investigación es baja.

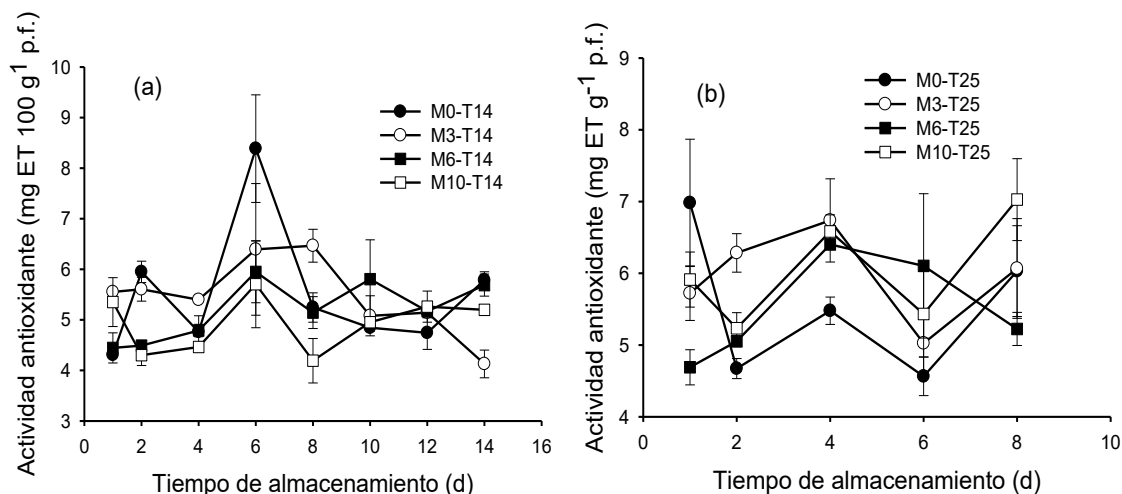


Figura 25. Comportamiento de la actividad antioxidante en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Actividad antioxidante de frutos almacenados a 14 °C, (b) Actividad antioxidante de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10. Las barras corresponden al error estándar de la media obtenida a partir de tres repeticiones.

Álvarez-Vargas et al. (2017) indican que la alta actividad antioxidante en *S. purpurea* fue encontrada en la epidermis y baja en pulpa. Suárez-Vargas et al. (2017) mencionan que la actividad antioxidante en pulpa es baja en cualquier estado de madurez en frutos con 75 % de coloración ($673.84 \mu\text{M ET } 100 \text{ g}^{-1} \text{ p.f.}$) y en frutos verdes ($401.17 \mu\text{M ET } 100 \text{ g}^{-1} \text{ p.f.}$) a diferencia de la epidermis el valor más bajo fue 698.44 y el más alto $1534.7 \mu\text{M ET } 1000 \text{ g}^{-1} \text{ p.f.}$ en los mismos estados de maduración. Almeida et al. (2011) reportan $6.25 \mu\text{M ET } 100 \text{ g}^{-1} \text{ p.f.}$ en la especie *Spondias purpurea*.

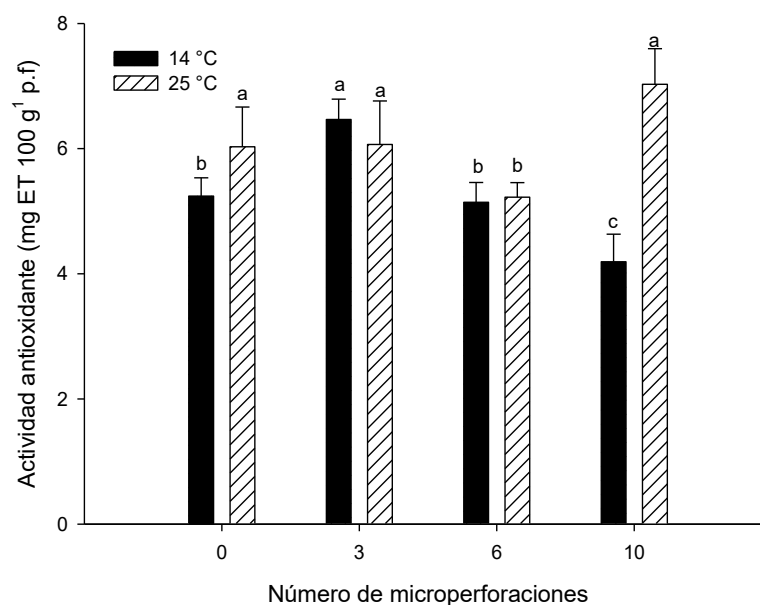


Figura 26. Actividad antioxidante al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.

Por otro lado, Jacobo-Velázquez y Cisneros-Zevallos (2009) reportan que la presencia de compuestos fenólicos no necesariamente indica una respuesta óptima de la actividad antioxidante. Por lo que Milanez, Neves, Colombo, Shahab, y Roberto, (2018) indican que es posible que otras sustancias, además, de los compuestos fenólicos, pueden contribuir a la alta actividad antioxidante de algunos frutos. La capacidad antioxidante varía según el tipo de compuesto fenólico presente, así como en respuesta a los cambios en el contenido de carotenoides, vitamina C y vitamina E. Esta composición, a su vez, puede verse influida por el tipo de especie, variedad, origen geográfico, condiciones edafológicas, estado de madurez (Silvia et al., 2012; Ribeiro et al., 2013).

La actividad antioxidante de un compuesto fenólico específico está relacionada con el número de grupos hidroxilo disponibles presentes en la estructura química. Por lo tanto, la forma en que estos compuestos neutralizan los radicales libres

dependerá de sus concentraciones relativas. Además los compuestos fenólicos pueden actuar de forma sinérgica (Cirico & Omaye, 2006).

4.3.6 Clorofilas

Los factores temperatura, tiempo y microperforado afectaron significativamente ($P \leq 0.05$) el contenido de clorofilas en frutos de ciruela mexicana durante el almacenamiento, en los tratamientos almacenados a 14 °C. La degradación de estos compuestos fue menor, debido a que la temperatura retrasó el proceso de maduración, en los tratamientos M0, M3, M6 y M10-T25 al octavo día el contenido de clorofilas fue bajo con respecto al primer día de la evaluación (Figura 27). En la Figura 28 se observó que la mayor concentración de clorofilas es a 14 °C, mientras que los frutos almacenados a 25 °C se mostró mayor degradación de este compuesto.

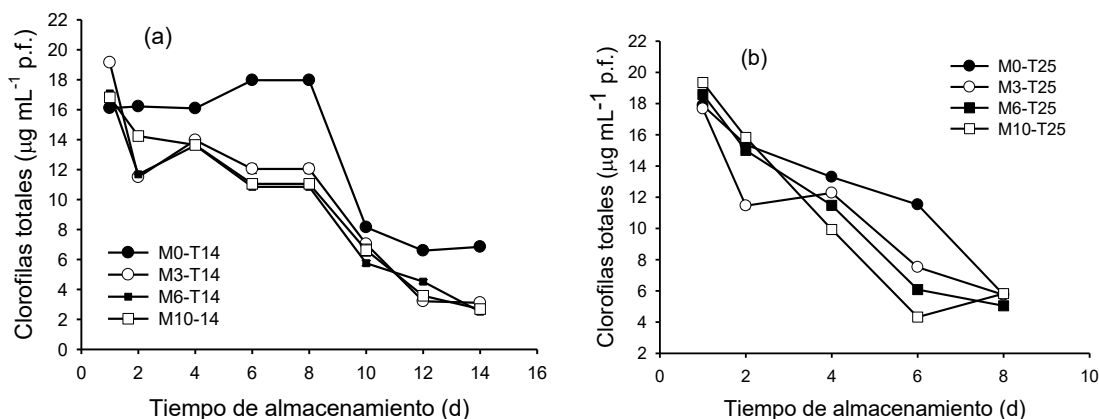


Figura 27. Comportamiento de las clorofilas en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (T). (a) Clorofilas de frutos almacenados a 14 °C, (b) Clorofilas de frutos almacenados a 25 °C. Número de microperforaciones (M) en el empaque: M0, M3, M6 y M10.

Durante el desarrollo de los cromoplastos de frutos maduros o escamas de frutos, cambian de verde a amarillo, naranja o rojo y la proporción disminuye continuamente. Una de las razones por las cuales la concentración de clorofilas

y carotenoides fue bajo se debe a las condiciones de luz como lo explican Lichtenthaler y Buschmann, (2001) las hojas que tienen mayor luz del sol poseen paredes celulares más gruesas y un menor contenido de agua foliar y mayor peso seco que las hojas de sombra. Eso puede ser considerado como un factor que determine la razón por la cual se han encontrado concentraciones más altas en algunos ecotipos de ciruela ya que el epicarpio tiende a ser más grueso en unas variedades, además, la época de cosecha también puede ser un factor que afecte la concentración, principalmente en aquellos frutos cosechados en la época seca.

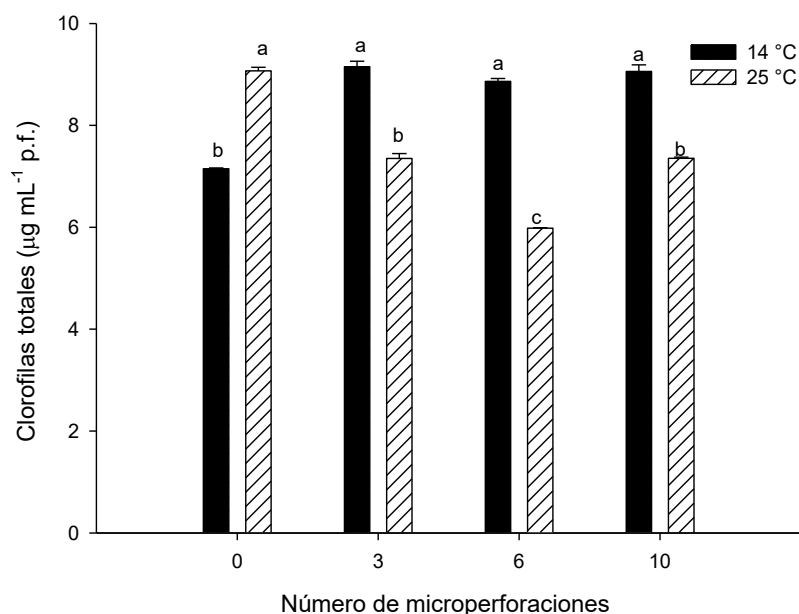


Figura 28. Clorofilas totales al octavo día de almacenamiento en frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña, empacadas en bolsas de polietileno de baja densidad ($e=0.062 \mu\text{m}$) con cuatro niveles de microperforado y almacenadas a dos temperaturas (14 °C y 25 °C). Número de microperforaciones (M) en el empaque: 0, 3, 6 y 10. Letras diferentes indican diferencia significativa.

Cuadro 5. Contenido de compuestos antioxidantes al inicio y final del almacenamiento de frutos de ciruela mexicana almacenados en atmósferas modificadas con diferentes niveles de microperforado (0, 3, 6, 10) en dos temperaturas (T)

Tratamientos	Compuestos fenólicos (mg EAG 100 g ⁻¹ p.f)		Flavonoides (mg EQ 100 g ⁻¹ p.f)		A. A (mg ET 100 g ⁻¹ p.f)		Carotenoides pulpa (µg mL ⁻¹ p.f.)		Carotenoides epicarpio (µg mL ⁻¹ p.f.)		Clorofilas totales (µg mL ⁻¹ p.f.)	
	D1		D8		D1		D8		D1		D8	
M0-T14	42.06	73.5 ^z	3.70	6.65*	4.31	5.24	5.19	6.27*	9.27	10.0*	16.21	7.15*
M3-T14	63.67	57.03	4.33	3.79	5.55	6.47	5.55	6.12*	7.17	11.2*	11.49	9.15*
M6-T14	54.77	67.63	3.36	3.36	4.45	5.14	4.92	7.49*	7.55	16.2*	11.68	8.86*
M10-T14	70.45	50.2*	4.08	6.34*	5.35	4.19	5.85	8.92*	8.40	12.5*	14.24	9.06*
M0-T25	80.48	73.53	3.89	4.20	6.98	6.03	5.24	6.41*	9.95	19.7*	15.37	9.07*
M3-T25	69.04	55.0*	3.86	3.20	5.72	6.07	4.79	9.44*	8.49	12.2*	11.46	7.35*
M6-T25	53.93	57.60	3.75	5.06*	4.69	5.22	4.66	11.9*	8.81	15.1*	15.00	5.82*
M10-T25	69.18	90.2*	3.56	4.83*	5.91	7.03	5.14	13.3*	9.48	18.5*	15.83	7.35*

^z Diferencia significativa entre el inicio (D1) y final del almacenamiento (D8). A. A. (actividad antioxidante)

En el Cuadro 4 se enfatiza el comportamiento en poscosecha de los compuestos antioxidantes en frutos de ciruela mexicana a los ocho días de almacenamiento, en cuanto a la actividad antioxidante no se encontraron diferencias significativas al inicio y al final de la evaluación, mientras que en compuestos fenólicos y flavonoides en algunos tratamientos hubo incremento o disminución al final el almacenamiento, para el caso de clorofilas y carotenoides en pulpa y epicarpio le afectó significativamente en todos los tratamientos su concentración como resultado del proceso de maduración.

En cuanto a la correlación entre compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides y actividad antioxidante, se tiene una alta correlación entre los compuestos fenólicos y la actividad antioxidante, la relación entre flavonoides y actividad antioxidante es negativa, mientras que para el resto de las variables la relación es muy baja (Cuadro 6).

Cuadro 6. Correlación entre compuestos antioxidantes de frutos de ciruela mexicana ecotipo cuernavaqueña

Variable	Coeficiente de correlación (r)
COMPF-A.A	0.5683657
FLAV-A.A	-0.187675
CARP-A.A	0.2188644
CARE-A.A	0.1898766

COMPF (compuestos fenólicos), A.A (actividad antioxidante), FLAV (flavonoides), CARP (carotenoides en pulpa) y CARE (carotenoides en epicarpio).

4.4 Conclusiones

El almacenamiento a diferentes temperaturas con atmósferas modificadas no afectó las concentraciones de compuestos fenólicos, flavonoides, y actividad antioxidante durante el tiempo de almacenamiento, principalmente en aquellos almacenados a 14 °C. Del mismo modo no afectó la concentración de carotenoides en pulpa como en epicarpio puesto que aumentó su contenido, mientras que las clorofilas disminuyeron durante el periodo de almacenamiento. El nivel de microperforado no afectó de forma considerable la concentración de los compuestos antioxidantes en ninguno de los tratamientos ya que durante el periodo de almacenamiento no se observó una concentración superior entre ellos.

4.5 Literatura citada

- Almeida, M. M. B., de Sousa, P. H. M., Arriaga, Â. M. C., do Prado, G. M., Magalhães, C. E. de C., Maia, G. A., & de Lemos, T. L. G. (2011). Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh exotic fruits from northeastern Brazil. *Food Research International*, 44(7), 2155–2159. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.051>
- Álvarez-Vargas, J. E., Alia-Tejaca, I., Chavez-Franco, S. H., Colinas-León, M. T., Nieto-Ángel, D., Rivera-Cabrera, F., & Aguilar-Pérez, L. A. (2017). Ciruelas mexicanas (*Spondias purpurea* L) de clima húmedo y seco: Calidad, metabolitos funcionales y actividad antioxidante. *Interciencia*, 42(10), 653–660.
- Cadena Meneses, J., & Castillo Morales, A. (2002). Comparación de diferentes métodos para la estimación de componentes de varianza. *Agrociencia*, 36(6), 713-723.
- Cândido, T. L. N., Silva, M. R., & Agostini-Costa, T. S. (2015). Bioactive compounds and antioxidant capacity of buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.) from the Cerrado and Amazon biomes. *Food Chemistry*, 177, 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.041>
- Chang, C.-C., Yang, M.-H., & Wen, H.-M. (2002). Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178–182. <https://doi.org/N/A>
- Cirico, T. L., & Omaye, S. T. (2006). Additive or synergetic effects of phenolic compounds on human low density lipoprotein oxidation. *Food and Chemical Toxicology*, 44(4), 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.08.025>
- Dumas, Y., Dadomo, M., Di Lucca, G., & Grolier, P. (2003). Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(5), 369–382. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1370>
- Gautam, D.M; S. Joshi; K.M. Tripath; A.L. Acedo Jr.; W. Easdown; J.A. Hughes; J.D.H. Keatinge. 2017. Effects of modified atmosphere packaging and shelf life of tomatoes in Nepal. *Acta Horticultura*. 1179:183-188.
- Gayosso-García, L. E., Yahia, M. E., González-Aguilar, G. A. (2011). Identification and quantification of phenols, carotenoids, and vitamin C from papaya (*Carica papaya* L., cv. Maradol) fruit determined by HPLC-DAD-MS/MS-ESI. *Food Research International*, 44(5), 1284-1291, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.001>
- Guevara, L., & Alvarado, D. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate. *Avances De Investigacion Agropecuaria*, 18(1), 51–66.

- Haminiuk, C. W. I., Maciel, G. M., Plata-Oviedo, M. S. V., & Peralta, R. M. (2012). Phenolic compounds in fruits - an overview. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(10), 2023–2044. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03067.x>
- Hotta, H., Sakamoto, H., Nagano, S., Osakai, T., & Tsujino, Y. (2001). Unusually large numbers of electrons for the oxidation of polyphenolic antioxidants. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 1526(2), 159–167. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(01\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(01)00123-4)
- Jacobo-Velázquez, D. A., & Cisneros-Zevallos, L. (2009). Correlations of antioxidant activity against phenolic content revisited: A new approach in data analysis for food and medicinal plants. *Journal of Food Science*, 74(9), 107–113. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01352.x>
- Lea, U. S., Slimestad, R., Smedvig, P., & Lillo, C. (2007). Nitrogen deficiency enhances expression of specific MYB and bHLH transcription factors and accumulation of end products in the flavonoid pathway. *Planta*, 225(5), 1245–1253. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0414-x>
- Li, L., Wang, S., Chen, J., Xie, J., Wu, H., Zhan, R., & Li, W. (2014). Major antioxidants and in vitro antioxidant capacity of eleven mango (*Mangifera Indica* L.) cultivars. *International Journal of Food Properties*, 17(8), 1872–1887. <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.687798>
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1(1), F4.3.1-F4.3.8. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- Maldonado-Astudillo, Y. I., Navarrete-García, H. A., Ortiz-Morales, Ó. D., Jiménez-Hernández, J., Salazar-López, R., Alia-Tejacal, I., & Álvarez-Fitz, P. (2016). Physical, chemical and antioxidant properties of mango varieties grown at the Guerrero coast. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(3), 207–214. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.084995554279&partnerID=40&md5=0bcef0dce40060a88ead51ab99ddb32>
- Milanez, J. T., Neves, L. C., Colombo, R. C., Shahab, M., & Roberto, S. R. (2018). Bioactive compounds and antioxidant activity of buriti fruits, during the postharvest, harvested at different ripening stages. *Scientia Horticulturae*, 227(December 2016), 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.045>
- Moco, S., Capanoglu, E., Tikunov, Y., Bino, R. J., Boyacioglu, D., Hall, R. D., ... De Vos, R. C. H. (2007). Tissue specialization at the metabolite level is perceived during the development of tomato fruit. *Journal of Experimental Botany*, 58(15–16), 4131–4146. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm271>
- Mohyeldin, A., Garzón-Muvdi, T., & Quiñones-Hinojosa, A. (2010). Oxygen in stem cell biology: A critical component of the stem cell niche. *Cell Stem Cell*, 7(2), 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.stem.2010.07.007>

- Olsen, K. M., Slimestad, R., Lea, U. S., Brede, C., Løvda, T., Ruoff, P., ... Lillo, C. (2009). Temperature and nitrogen effects on regulators and products of the flavonoid pathway: Experimental and kinetic model studies. *Plant, Cell and Environment*, 32(3), 286–299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01920.x>
- Rivera-Pastrana, D. M., Yahia, E. M., & González-Aguilar, G. A. (2010). Phenolic and carotenoid profiles of papaya fruit (*Carica papaya* L.) and their contents under low temperature storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(14), 2358–2365. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4092>
- Slimestad, R., & Verheul, M. J. (2005). Seasonal variations in the level of plant constituents in greenhouse production of cherry tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(8), 3114–3119. <https://doi.org/10.1021/jf047864e>
- Solorzano-Morán, S., Alia-Tejacal, I., Rivera-Cabrera, F., López-Martínez, V., Pérez-Flores, L. J., Pelayo-Zaldívar, C., Maldonado-Astudillo, Y. I. (2015). Quality attributes and functional compounds of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.) fruit ecotypes. *Fruits*, 70(5), 261–270. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015027>
- Solovchenko, A. E., Chivkunova, O. B., Merzlyak, M. N., & Gudkovsky, V. A. (2005). Relationships between chlorophyll and carotenoid pigments during on- and off-tree ripening of apple fruit as revealed non-destructively with reflectance spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 38(1), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.05.004>
- Tomás-Barberán, F. A., & Espín, J. C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 853–876. <https://doi.org/10.1002/jsfa.885>
- Vargas-Suárez, A., Juárez-López, P., López-Martínez, V., Flores-Pérez, L. J., Sánchez-Guillén, D., & Alia-Tejacal, I. (2017). Botânica e fisiologia/ botany and physiology antioxidant activity and physicochemical parameters in ‘cuernavaqueña’ mexican plum (*Spondias purpurea* L.) at different ripening stages. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39(4), e-787. Epub September 12, 2017. <https://dx.doi.org/10.1590/0100-29452017787>
- Villa-Hernández, J. M., Mendoza-Cardoso, G., Mendoza-Espinoza, A., Fernando, D., & Rivera-Cabrera, F. (2017). Antioxidant Capacity *In Vitro* and *In Vivo* of Various Ecotypes of Mexican Plum (*Spondias purpurea* L.). *Journal of Food Science*, 82(11). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13862>