



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**CONSERVACIÓN DE FRUTOS DE TUNA BLANCA (*Opuntia albicarpa*) EN
ATMÓSFERA MODIFICADA**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO

EN CIENCIAS:

EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

PRESENTA:

OCTAVIO MUÑOZ CHOCOLATL



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Julio de 2009

Chapingo, Estado de México.

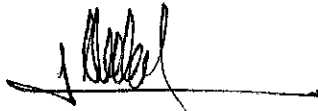
**Conservación de frutos de tuna blanca (*Opuntia albicarpa*) en atmósfera
modificada**

Tesis realizada por Octavio Muñoz Chocolatl bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito para
obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN:

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTOR:



DR. SALVADOR VALLE GUADARRAMA

ASESOR:



DRA. MA. TERESA MARTÍNEZ DAMIÁN

ASESOR:



M.C. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

Chapingo, Texcoco, México, Julio de 2009

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Chapingo** "Porque Chapinguero no es sólo una palabra, es el apellido que nos heredan nuestros segundos padres, es decir, nuestra Alma Mater: *la Universidad Autónoma Chapingo, y nuestro padre: el pueblo de México; porque sin alguno de ellos no tendríamos la oportunidad de estudiar y prepararnos.*

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama, por presidir el Consejo Asesor y dirigir la presente investigación, por su gran apoyo, paciencia y dedicación para que este trabajo se concluyera exitosamente.

A la Dra. Ma. Teresa Martínez Damián, por formar parte del Consejo Asesor, por su excelente disponibilidad, asesoría y colaboración en la realización de la tesis.

Al MC. Artemio Pérez López, por formar parte del Comité Asesor y el invaluable apoyo académico brindado, así como su paciencia en la revisión de los escritos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado durante mi formación académica.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor del presente trabajo, Ingeniero Agroindustrial, es originario de Santa María Zacatepec, Cholula, Puebla. Realizó estudios de Educación Superior en la Universidad Autónoma Chapingo, donde cursó la carrera de Ingeniero Agroindustrial de 1995 a 2000. Realizó la Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria en el Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo durante el período 2006-2008.

Índice

Índice	iii
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE CUADROS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 UBICACIÓN TAXONÓMICA	4
2.2 PAÍSES PRODUCTORES DE TUNA EN EL MUNDO	4
2.3 PAÍSES CONSUMIDORES	6
2.4 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA TUNA EN MÉXICO	7
2.5 VARIEDADES	8
2.6 ESTADOS PRODUCTORES	9
2.7 CANALES DE COMERCIALIZACIÓN	10
2.8 DESCRIPCIÓN DEL FRUTO	11
2.8.1 Composición química	12
2.8.2 Descripción de algunos parámetros de calidad en la tuna	14
2.9 PATRÓN DE RESPIRACIÓN	15
2.10 MADURACIÓN Y COSECHA	15
2.10.1 Maduración	15
2.10.2 Cosecha	17
2.10.3 Desespinado	18
2.10.4 Encerado	18
2.10.5 Selección y empaque	19
2.10.6 Almacenamiento y transporte	19
2.11 TECNOLOGÍA POSTCOSECHA	19

2.11.1 Fisiología postcosecha de la tuna.....	20
2.11.2 Producción de metabolitos anaerobios: acetaldehído y etanol	22
2.11.3 Tecnología postcosecha	24
2.12 MANEJO DE ATMÓSFERAS MODIFICADAS.....	24
2.12.1 Velocidad de respiración.....	24
2.12.2 Permeación de las películas plásticas	28
2.12.4 Aplicación de la teoría de la cinética enzimática de Michaelis-Menten para caracterizar la respiración de productos frescos.	31
3. MATERIALES Y MÉTODOS	35
3. 1. ORGANIZACIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	35
3.1.1. Material vegetal.	35
3.1.2. Fases de investigación	35
3.2. FASE DE INVESTIGACIÓN UNO	36
3.2.1. Caracterización respiratoria	36
3.2.2. Validación del modelado del comportamiento respiratorio.....	42
3.3. FASE DE INVESTIGACIÓN DOS	43
3.3.1. Modelado de la operación de una AM.	44
3.3.2. Parametrización de modelos.	48
3.3.3. Estudio de la operación de la AM.	50
3.4. FASE DE INVESTIGACIÓN TRES.....	52
3.4.1. Organización experimental general.	52
3.4.2. Material vegetal y caracterización inicial:	53
3.4.3. Manejo de tratamientos.	54
3.4.5. Manejo de los envases.	55
3.4.6 Unidad experimental	56
3.5 VARIABLES RESPUESTAS	56
3.5.1 Intensidad de color.....	57
3.5.2. Firmeza.....	57
3.5.3 Pérdida fisiológica de peso	58
3.5.4 Sólidos solubles totales	58
3.5.5 Acidez titulable.....	58

3.5.6 Azúcares totales	59
3.5.7 Azúcares reductores	59
3.5.8 Medición de concentraciones	60
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1. FASE DE INVESTIGACIÓN UNO	62
4.2. FASE DE INVESTIGACIÓN DOS	75
4.3. FASE DE INVESTIGACIÓN TRES	78
4.3.1. Calidad a la cosecha	78
4.3.2. Condiciones de operación	80
4.3.3. Metabolitos anaerobios (etanol y acetaldehído)	83
4.3.4. Variables físicas	87
4.3.4.1. Pérdida de peso	88
4.3.4.2. Textura (Pulpa-Cáscara)	88
4.3.4.3 Color	92
4.3.5 Variables químicas	95
4.3.5.1 Sólidos solubles totales (°Brix)	95
4.3.5.2. Acidez	100
4.3.5.3. Azúcares totales-azúcares reductores	102
5 CONCLUSIONES	105
6.- LITERATURA CITADA	107

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona productora de tuna blanca, en San Felipe Teotitlán, Estado de México.	35
Figura 2. Montaje de primera fase de investigación.....	43
Figura 3. (A). Interacciones (fruto)-(atmósfera circundante) y (atmósfera circundante)-(atmósfera externa) en un sistema de atmósfera modificada. El recuadro sombreado que rodea los frutos esquematiza la película plástica de envase. (B) Variación de concentración de O_2 y CO_2 en la instalación de una atmósfera modificada. RT: fase de régimen transitorio; RE: fase de régimen estacionario.....	44
Figura 4. Unidades experimentales.....	56
Figura 5. Cinéticas de cambio pasivo de concentración de O_2 y CO_2 a 20 °C en recipientes herméticos de 3.21 L de capacidad que contenían lotes de tuna de 1.64 (± 0.07) kg. Los recuadros $A_{i,j,k}$ refieren unidades manejadas con cal (CO_2 ausente) y la $B_{i,j,k}$ unidades sin cal (CO_2 ausente), donde los subíndices i, j y k indican respectivamente temperatura, repetición y presencia (cc) o ausencia (sc) de cal colocada para depurar CO_2	62
Figura 6 . Cinéticas de cambio pasivo de concentración de O_2 y CO_2 a 8 °C en recipientes herméticos de 3.21 L de capacidad que contenían lotes de tuna de 1.64 (± 0.07) kg. Los recuadros $A_{i,j,k}$ refieren unidades manejadas con cal (CO_2 ausente) y la $B_{i,j,k}$ unidades sin cal (CO_2 ausente), donde los subíndices i, j y k indican respectivamente temperatura, repetición y presencia (cc) o ausencia (sc) de cal colocada para depurar CO_2	63
Figura 7. Rectas de Lineweaver-Burk para la relación entre el consumo de O_2 (g_{O_2}) y la concentración del mismo gas expresada como presión parcial (p_{O_2})....	66
Figura 8. Cinéticas de Michaelis-Menten para la funcionalidad entre el consumo de O_2 (g_{O_2}) y la concentración (%) del mismo gas a 20 y a 8 °C.....	68
Figura 9 Efecto de la temperatura, de la presencia de O_2 y de la presencia de CO_2 sobre la velocidad de consumo de O_2 de frutos de tuna blanca.	68
Figura 10. Comparación de datos experimentales (líneas continuas construidas mediante los modelos de regresión) y los datos simulados (datos discretos obtenidos con modelos de Michaelis-Menten). Las letras A a la representan condición de 8 °C y las B a la condición de 20 °C. El subíndice en las leyendas señala la repetición.	75

Figura 11. Dependencia del espesor de envase y concentración instalada de CO ₂ con la concentración instalada de O ₂ en el interior de una AM que maneja lotes de 300 g de frutos de tuna blanca. Los datos corresponden a película de polietileno de baja densidad (PBD) con 0.12 m ² de área de intercambio.	77
Figura 12. Efecto del volumen libre en la AM sobre el tiempo de instalación. Los volúmenes analizados fueron: (a) 0.5 L, (b) 1.0 L, (c) 1.5 L y (d) 2.0 L.....	78
Figura 13. Cinéticas de cambio de O ₂ y CO ₂ de la atmósfera circundante de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ-20-[O ₂], TZ-8-[O ₂], TZ-20-[CO ₂], TZ-8-[CO ₂]; Ziploc®, TP-20-[O ₂], TP-8-[O ₂], TP-20-[CO ₂], TP-8-[CO ₂]; polietileno;. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.....	82
Figura 14. Cinéticas de cambio de metabolitos anaerobios (etanol y acetaldehído) de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.	86
Figura 15. Cinéticas de cambio de pérdida de peso (%) promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.....	90
Figura 16. Cinéticas de cambio de textura promedio de pulpa y de cáscara (N: Newtons), de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.	91
Figura 17 Cambio en color y apariencia física de la tuna blanca almacenada en atmósfera modificada con películas plásticas (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento) a 20 y 8 °C.	95
Figura 18. Cinéticas de cambio de atributos de color (luminosidad, croma y ángulo Hue) de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.	96
Figura 19. Cinéticas de cambio de grados brix promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.....	99
Figura 20. Cinéticas de cambio de acidez (% ácido cítrico) promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.....	101
Figura 21. Cinéticas de cambio de contenido de azúcares totales y azúcares reductores (mg/100 mL) promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.	104

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía del Nopal	5
Cuadro 2 Superficie, rendimiento, producción, exportación, importación de tuna a nivel Mundial.2003	6
Cuadro 3. Consumo internacional de tuna mexicana.....	7
Cuadro 4 .Zonas productoras de México	8
Cuadro 6. Estados productores de tuna.....	10
Cuadro 7. Composición de la pulpa y cáscara de la tuna	13
Cuadro 8. Valores de permeabilidad a O ₂ y a CO ₂ del polietileno de baja densidad (PBD) a las condiciones de 0 y 15 °C.	49
Cuadro 9. Estimación de coeficientes de permeabilidad a O ₂ y a CO ₂ de polietileno de baja densidad (PBD) mediante valores de Q ₁₀	52
Cuadro 10. Constantes de regresión asociadas a las Ecuaciones (4) y (5) para la representación de la variación de O ₂ y CO ₂ a 20 y 8 °C en el interior de recipientes de 3.21 L con lotes de 1.64 (±0.07) kg de frutos de tuna blanca.	64
Cuadro 11. Comparación de medias del cociente respiratorio (<i>Cr</i>) entre temperaturas para corridas experimentales donde no se depuró el CO ₂	67
Cuadro 12. Comparación de pendientes (kg _{fr} s kPa kg _{O2} ⁻¹) de rectas de Lineweaver-Burk para la relación entre el consumo de O ₂ y la concentración de O ₂ a dos temperaturas (8 y 20 °C) bajo dos condiciones de concentración de CO ₂ (ausente y presente).	67
Cuadro 13. Comparación de parámetros de Michaelis-Menten aparentes para la relación entre el consumo de O ₂ y la concentración de O ₂ a dos temperaturas (8 y 20 °C) bajo dos condiciones de concentración de CO ₂ (ausente y presente).70	
Cuadro 14. Efecto de la temperatura sobre la actividad respiratoria de frutos de tuna blanca, expresada por medio de parámetros de cinética enzimática de Michaelis-Menten.	73
Cuadro 15. Caracterización química y física inicial del fruto de tuna (<i>Opuntia albicarpa</i>).	80
Cuadro 16. Comparación de medias de tratamientos de respiración (consumo de oxígeno y producción de CO ₂) de frutos de tuna afectadas por película de	

envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo..... 84

Cuadro 17. Comparación de medias de tratamientos de metabolitos anaerobios de frutos de tuna afectadas por película de envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo. . 87

Cuadro 18. Comparación de medias de tratamientos de variables físicas de frutos de tuna afectadas por película de envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo..... 89

Cuadro 19. Comparación de medias de tratamientos de variables químicas de frutos de tuna afectadas por película de envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo..... 97

CONSERVACIÓN DE FRUTOS DE TUNA BLANCA (*Opuntia albicarpa*) EN ATMÓSFERA MODIFICADA

CONSERVATION OF CACTUS PEAR (*Opuntia albicarpa*) FRUITS IN MODIFIED ATMOSPHERE

RESUMEN

El fruto de tuna (*Opuntia albicarpa*) se consume normalmente en fresco y se recomienda el uso de baja temperatura, pero no siempre hay infraestructura disponible. Las atmósferas modificadas (AM) pueden ser una alternativa al manejo refrigerado o ser un complemento del mismo, pero su implementación requiere de un diseño cuidadoso para operar adecuadamente. Los objetivos del trabajo fueron estudiar la actividad respiratoria del fruto en condiciones de O₂ y CO₂ de AM, evaluar los parámetros de operación y los cambios en postcosecha bajo un manejo en AM. La actividad respiratoria se caracterizó con la teoría de la cinética enzimática y se construyó un modelo acompetitivo, con valores de consumo máximo de O₂, constante de Michaelis-Menten y relación concentración de CO₂ a constante acompetitiva de 30.4 mL kg⁻¹ h⁻¹, 3.1 % y -9.7, a 20 °C y de 24.0 mL kg⁻¹ h⁻¹, 10.8 % y -9.9 a 8 °C, respectivamente. Para una operación adecuada a 20 °C con O₂ entre 2 y 6 % en el envase plástico, se requiere un espesor de éste entre 38 y 17 µm con CO₂ instalado entre 4.0 y 3.2 %, pero para 8 °C el espesor debe ser entre 80.0 y 26.4 µm, con CO₂ entre 4.3 y 3.4 %, respectivamente. La aplicación de la técnica de AM en postcosecha resultó en una reducción de la pérdida de peso, la conservación del color y de la firmeza de los frutos y la reducción de la velocidad de respiración con baja actividad fermentativa. A 20 °C, la AM permitió un manejo hasta por 15 d con oxidación moderada de la cáscara, pero a 8 °C la conservación se consiguió extender hasta por 45 d.

Palabras clave: *Opuntia albicarpa*, atmósferas modificadas, respiración.

SUMMARY

The cactus pear (*Opuntia albicarpa*) fruit is normally consumed fresh and the use of low temperature is recommended, but there is not always infrastructure available. Modified atmospheres (MA) can serve as an alternative to refrigerated handling or as a complement to it, but its implementation requires a careful design to operate adequately. The objectives of this work were to study fruit respiratory activity under O₂ and CO₂ MA conditions, and to evaluate the operation parameters of the MA system and the postharvest changes of the fruit under MA handling. The respiratory activity was characterized through the kinetic enzymatic theory and an uncompetitive model was constructed, with values for maximum O₂ consumption, Michaelis-Menten constant and a ratio of CO₂ concentration to the uncompetitive constant of 30.4 mL kg⁻¹ h⁻¹, 3.1 % and -9.7 at 20 °C, and of 24.0 mL kg⁻¹ h⁻¹, 10.8 % and -9.9 at 8 °C, respectively. In order to have an adequate operation at 20 °C, with O₂ between 2 and 6 % inside the plastic package, a film thickness of between 38 and 17 µm is required, with CO₂ installed between 4.0 and 3.2 %, but for 8 °C the thickness has to be between 80 and 26.4 µm, with CO₂ between 4.3 and 3.4 %, respectively. The postharvest application of the MA technique resulted in reduced weight loss, fruit color and firmness conservation, and a reduced respiration rate with low fermentative activity. At 20 °C, the MA allowed a handling up to 15 d with moderate skin oxidation, but at 8 °C it was able to extend the conservation up to 45 d.

Key words: *Opuntia albicarpa*, modified atmospheres, respiration.

1. INTRODUCCIÓN

México es el país más rico en especies del subgénero *Opuntia*, además de ser considerado centro de origen (Pimienta y Nobel, 1995) con aproximadamente 110 especies (Fernández y Mondragón, 1996). En México, la tuna es un fruto de amplia importancia desde el punto de vista biológico, económico y social debido a características biológicas tales como resistencia a la sequía y alta eficiencia en el uso de agua (Fernández y Mondragón, 1996).

El manejo postcosecha que se le da a este material es y ha sido desde el principio muy sencillo y poco tecnificado, sin embargo, el esquema productivo ha crecido y los sistemas de distribución y de comercialización se han complicado. Solamente en algunas regiones de México poseen el conocimiento y el uso adecuado de las tecnologías postcosecha aplicadas a la tuna. Tal es el caso de los productores de Zacatecas y del Estado de Puebla (Corrales, 2003).

Actualmente la importancia del fruto de tuna ha generado interés de investigación en diversas instituciones de México, y de otros países, tanto en el aspecto científico como en el tecnológico. Se necesita realizar investigación en el aspecto postcosecha y en la forma de generarle valor

agregado al fruto por medio de las diferentes formas de industrialización (Corrales, 2003).

La aplicación de tecnologías de manejo postcosecha como lo son las atmósferas modificadas (AM) pueden ser una buena opción para poder ofertar el producto durante todo el año y así mantener un precio mucho más rentable. Las AM presentan una buena alternativa para poder almacenar frutos de tuna aún en los casos donde se cuenta con sistemas de refrigeración, pues en tal situación permiten mejorar los tiempos de conservación.

A la fecha se han realizado diversos estudios sobre el comportamiento postcosecha del fruto de tuna; el empaçado con películas plásticas de polietileno encogible al calor, reduce considerablemente la pérdida de peso de la tuna, aminora el daño por frío y le confiere una mejor apariencia, pero no reduce la pudrición durante 6 semanas de frigoconservación a 6 °C y subsecuente comercialización a 20 °C (Piga *et al.*, 1996, citados por Inglese *et al.*, 2002). Asimismo, la tuna envuelta con película de poliolefina conserva la frescura del fruto y reduce grandemente la pérdida de peso durante 4 semanas de almacenamiento a 9 °C y su subsiguiente mercadeo (Piga *et al.* 1997).

Las AM constituyen un método que en complemento a la refrigeración o sin ella puede contribuir al incremento de la vida útil del fruto de tuna. Se puede mencionar que se desarrollan con plásticos, que en su interior se coloca al

producto a conservar y que se induce la reducción de O_2 y la elevación de CO_2 en el ambiente inmediato a dicho producto. Se debe mencionar que esta modificación ha demostrado en distintos productos que puede afectar diversos procesos fisiológicos y que con ello se consigue un alargamiento de la vida útil (Kader y Saltveit, 2003).

El presente trabajo se planteó con la premisa de que se deben estudiar los distintos elementos que intervienen en el desarrollo de un sistema de atmósfera modificada para determinar condiciones un manejo adecuado de la tuna bajo dicha técnica. Con su desarrollo se ha pretendido contribuir al mejoramiento de las condiciones de comercialización de los productores de tuna en México. De acuerdo con la experiencia de otros grupos de investigación (Corrales, *et. al.*, 2003), para diseñar adecuadamente una AM deben considerarse la forma como interacciona el producto con su ambiente inmediato, es decir, se debe investigar la forma en que se modifica la actividad respiratoria con la modificación de la atmósfera circundante. Asimismo, debe estudiarse la manera en que se desarrolla la interacción del ambiente inmediato del producto con su medio externo. En el primer aspecto existen fundamentalmente dos formas de caracterizar la actividad respiratoria; de ellas una se basa en la teoría de la cinética enzimática de Michaelis-Menten (Beaudry, 1999; Hertog, *et. al.*, 2002; Tri Ho *et al.*, 2008; Fonseca *et al.*, 2002; Svetlana *et al.*, 1995) y la otra en la teoría de adsorción de Langmuir (Makino *et al.*, 1996). Dado que el enfoque basado en la teoría de Michaelis-Menten está más sistematizado y es más aceptado, en el

presente trabajo se eligió como base metodológica para estudiar la interacción mencionada.

~~En este contexto, el presente trabajo se realizó con los~~ **OBJETIVOS** ~~de~~
estudiar el comportamiento postcosecha de frutos de tuna blanca (*Opuntia albicarpa*) mediante la caracterización de su actividad respiratoria en condiciones de O_2 y CO_2 distintos de las de aire natural, evaluar los parámetros de operación de una atmósfera modificada diseñada para manejar frutos de tuna en postcosecha y evaluar los cambios de este fruto a lo largo de su vida útil cuando se da un manejo en atmósfera modificada con y sin refrigeración.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La familia *Cactaceae* es endémica del continente americano, lo que significa que antes que el hombre distribuyera plantas de esta familia, no existían en Europa, África, Asia ni en Oceanía (Flores, 2003).

En México se llama nopal a las plantas de la familia *Cactaceae* de los géneros *Opuntia* y *Nopalea*. Debido a que presenta gran cantidad de especies. México es considerado como uno de los principales centros de origen de estas plantas (Flores, 2003). Se estima que el nopal, debido a su marcada resistencia a la sequía, rusticidad y diversidad de usos, ofrece una opción productiva a más de 35,000 productores. En el 2004 se reportaron un total de 71,368.8 ha cultivadas con nopal, de las cuales se obtiene comercialmente tuna en 51,112.91 ha, por lo que es el frutal más importante de las zonas áridas, y nopal verdura en 10,207.89 ha, con un rendimiento promedio de 60.71 t/ha, siendo la hortaliza con el mayor rendimiento.

2.1 Ubicación taxonómica

El género *Opuntia* en México presenta cinco subgéneros, diecisiete series y 104 especies (Cuadro 1) (Flores, 2003).

2.2 Países Productores de tuna en el mundo

Si bien es cierto que ni el número de productores que aprovechan comercialmente al nopal y ni las superficies de plantaciones comerciales

resultan tan significativos como en otras cadenas productivas en el contexto agropecuario del país, sí lo es la producción que aportan: en los últimos años la superficie cultivada con nopal en los principales países productores ha alcanzado cerca de 80 mil hectáreas, de las cuales el 90 % se localizan en México, lo que ha generado que México sea considerado como el productor de tuna más importante del mundo con 79.4 % (aproximadamente 500 mil toneladas) de la producción total en el mundo, le siguen Italia con el 12.2 % y Sudáfrica con el 3.7 % (Corrales y Flores, 2003).

Cuadro 1. Taxonomía del Nopal

Reino	Vegetal
Subreino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotiledónea
Subclase	Dialipétales
Orden	Opuntiales
Familia	<i>Cactaceae</i>
Subfamilia	<i>Opuntioideae</i>
Tribu	<i>Opuntiae</i>
Géneros	<i>Opuntia</i> y <i>Nopalea</i>

Fuente: Flores *et al.*, 2003

En el mundo cada día son más los países que están desarrollando el cultivo del nopal tunero, destacando entre ellos: México, Chile, Argentina, Bolivia, Perú, Colombia, Estados Unidos, Sudáfrica, Marruecos, Argelia, Egipto, Jordania, Pakistán, Israel, Grecia, Italia, España y Portugal, sin embargo son

pocos los países que su producción la destinan al mercado exterior: México, Italia, Sudáfrica, Chile, Israel y Estados Unidos (Cuadro 2).

El Cuadro 2 nos muestra que México es superior en cuanto a superficie sembrada, además presenta una ventaja competitiva con respecto a los demás países, estos basan su producción en una sola variedad y en México existe una gran riqueza varietal que permite ofrecer al mercado tunas blancas, amarillas, anaranjadas y rojas, sin embargo, tiene un gran problema, que los rendimientos son muy bajos comparados con los demás productores, que pone de manifiesto el gran déficit que México tiene en el nivel tecnológico en el campo.

Cuadro 2 Superficie, rendimiento, producción, exportación, importación de tuna a nivel Mundial.2003

País	Superficie (Ha)	Rendimiento (Ton/Ha)	Producción (Ton)	Exportación (Ton)	Importación (Ton)
México	72,500	6.75	489,375	7,500	-----
Italia	2,500	20.00	50,000	15,000	100
Sudáfrica	1,500	10.00	15,000	250	-----
Chile	1,000	7.00	7,000	40	-----
Israel	300	25.00	7,500	60	-----
Colombia	200	10.00	2,000	100	-----
EUA	200	20.00	4,000	100	8,000
Total	78,200	98.75	574,875	23,050	8,100

Fuente: Flores, 2003

2.3 Países consumidores

Debido a la globalización el mercado internacional del consumidor de tuna, esta abierto a cualquier país, pero esto hace que se demanden productos de

excelente calidad, que para el caso de México, son pocos los estados que poseen la infraestructura y los medios para poder producir bajo estas características. El principal destino de las exportaciones de México es el mercado estadounidense, principalmente con destino a los connacionales, en los últimos años los productores mexicanos han mostrado un gran interés en el mercado oriental en específico en Japón (Cuadro 3), (Landa y Treviño, 1996).

Cuadro 3. Consumo internacional de tuna mexicana

País	Consumo (ton)	%
EUA	5,000	25
Canadá	2,000	10
Europa Occidental	7,200	36
Europa Oriental	3,000	15
Países Árabes	2,000	10
Japón y otros	800	4
Total	20,000	100

Fuente: Landa y Treviño, 1996

2.4 Distribución geográfica de la tuna en México

Los nopales tuneros se cultivan principalmente en las zonas áridas del altiplano, donde la economía de muchos pobladores depende en gran medida de la tuna. En dichas poblaciones, se consume o se vende la fruta silvestre recolectada o producida. Existen tres zonas productoras de tuna, constituidas a su vez por 9 estados (Cuadro 4).

Los productores de las regiones Sur y Centro no dependen al 100 % de una sola variedad, algunas huertas producen la burrona, cristalina y rojo pelón, además de las recomendadas para el estado de Puebla, lo que les permite acceder a otro tipo de mercados y ampliar la posibilidad de elección al consumidor (Corrales, et al. 2003).

Cuadro 4 .Zonas productoras de México

Zona	Estados productores
Centro-Norte	Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato, Aguascalientes
Centro	Hidalgo, Estado de México
Sur	Puebla y Oaxaca

Fuente: Mondragón (1992).

2.5 Variedades

En el Cuadro 5 se presentan las principales variedades de nopal utilizadas en México para la producción de tuna, se observa que la mayoría se encuentran identificada únicamente con los nombres regionales. Las variedades de nopal cultivadas para producir tuna, se desarrollaron con la intervención del hombre durante miles de años en los agostaderos y los huertos familiares, por lo que son variedades obtenidas mediante selección (Flores, 2003). En el Estado de México la tuna "roja mexicana" llega a superar los 200 gramos y se exporta a Canadá y Japón, donde compite con la de Zacatecas, de cáscara delgada pero resistente al manejo. La región

centro tiene una gran diversidad de variedades con colores característicos: tunas blancas, amarillas, anaranjadas y rojas. (Cuadro 5).

2.6 Estados productores

El estado de México y Zacatecas son los principales estados productores de tuna seguidos por el estado de Hidalgo y Puebla, esto es considerando la superficie sembrada (Cuadro 6).

Cuadro 5. Variedades de tuna producidas en México

Estado productor	Variedades de tuna
Zacatecas	Burrona, Cristalina, Rojo Pelón, Rubí, Reyna , Torreoja, Amarilla Monteza, Amarilla Huesona, Picochulo Y Cardón, Burrona, Cristalina, Rojo Pelón
Jalisco	Torreoja, Amarilla Huesona, Picochulo Y Cardón, Gavia, Rojo Pelón, Rubí, Reyna
San Luís Potosí	Miquihuana, Cardón, Cristalina, Torreoja, Morada, Picochulo
Aguascalientes	Cardón
Guanajuato	Reyna, Rojo Pelón, Cardón
Querétaro	Esmeralda Y Cardón
Durango	Cardón
Hidalgo	Alfajayucan
México	Alfajayucan
Puebla	Villanueva
Tamaulipas	Miquihuana.

Fuente: Flores et al. (1995).

Cuadro 6. Estados productores de tuna

Estado Productor	Superficie sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Precio Medio rural(\$/ton)
Aguascalientes	495	340	1,115	3.3	1,158.83
Baja California Sur	16	14	76.7	5.5	4,880.31
Coahuila	131	0	0	0	0
Guanajuato	625	571	6,276	10.9	2,499.90
Hidalgo	5,504	4,636	31,920	6.9	1,599.19
Jalisco	2,203	1,605	4,900	3.0	3,000.0
México	14,840.5	14,840.5	199,609.09	13.4	1,450.99
Michoacán	11	11	90	8.18	2,208.89
Nayarit	54	0	0	0	0
Oaxaca	5	5	24	4.8	2,000.0
Puebla	2,384	2,384	42,800	17.9	2,167.55
Querétaro	392	392	408	1.0	1,197.30
San Luis Potosí	60	60	480	8.0	1,150.0
Tamaulipas	410	410	469.5	1.1	2,500.0
Veracruz	84	84	504	6.0	1,500.0
Zacatecas	15,741	13,027	75,634	5.8	1,810.23
Total	42,955.00	38,379.50	364,306.29	9.42	1820.18

Fuente: Servicio de información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera,
(SAGARPA, 2006).

2.7 Canales de comercialización

La forma de comercialización de la tuna en México es variado, en algunas regiones como Puebla, existen productores que son propietarios de locales y además comercializan su producto, y en algunas casos estos mismos productores compran la fruta a otros productores de la misma región para venderla en los mercados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Veracruz, Jalisco, Nuevo León y Guanajuato (Corrales y Flores, 2003).

2.8 Descripción del fruto

De acuerdo con Bravo (1978), citado por Corrales (2003), el fruto de tuna se deriva de un ovario ínfero, unilocular, con placentación parietal (Piga, 2004; Pimienta y Engleman 1985; Bravo, 1978). Alvarado (1978) estableció que la tuna muestra un patrón de crecimiento atípico, o sigmoide si se considera el crecimiento de la yema floral, desde su emergencia hasta el completo desarrollo del fruto. Otros autores (Kuti, 1992; Pimienta, 1990; Wessels, 1988 y 1990; citado por Nerd y Mizrahi, 1995) coinciden en que la tuna sigue un patrón de crecimiento sigmoidal. Sin embargo, Barbera et al. (1993), citado por Nerd y Mizrahi (1995), mencionan que el patrón de crecimiento del fruto de tuna es de tipo doble sigmoide, con tres fases consecutivas: la primera está caracterizada por un crecimiento acelerado que se inicia inmediatamente después de la antesis; la segunda, por una detención del crecimiento, y la tercera, por una repentina reanudación del mismo. En la primera se presenta una marcada ganancia de los pesos fresco y seco de cáscara, luego se registra un desarrollo importante de la semilla en la parte inicial de la segunda fase, y de la pulpa en la parte final de ésta y durante la tercera fase. El periodo completo de crecimiento puede tomar de 80 a 90 días, dependiendo de las condiciones ambientales (Corrales, 2003).

El fruto esta formado de afuera hacia a dentro, de los siguientes tejidos: tejidos corticales, carpelos, funículo y estructuras papilares; donde estos últimos forman la pulpa del fruto. La cáscara del fruto en este caso, en donde no existe diferenciación entre el mesocarpio, epicarpio y endocarpio, esta

constituida por el tejido cortical, el tejido axial y los carpelos; la capa formada por los carpelos usualmente es muy delgada y pueden aun separarse del pericarpio y quedar libre en el fruto maduro (Sepúlveda y Sáenz, 1990). La parte comestible del fruto, conocido comúnmente como corazón, consiste de numerosos funículos de las estructuras papilares y de los óvulos desarrollados sobre la placenta parietal; los funículos se ensanchan, crecen y terminan por envolver a los bolos completamente, hasta formar una cubierta externa. Puede decirse que el corazón consiste de semillas empacadas estrechamente y entremezclada con las estructuras papilares a manera de fieltro los cuales surgen del funículo y de las cubiertas de las semillas; de esta manera, la pulpa es una pseudoparénquima formado de las estructuras papilares, de la pared del carpelo y de los funículos (Borrego y Burgos, 1986).

2.8.1 Composición química

La tuna contiene aproximadamente el 83 % de agua y el 10 % de sucrosa, el resto es ácido tartárico, ácido cítrico, mucílago y otros mucopolisacáridos. La semilla contiene aceite, ácidos grasos, albumen y almidón. En materia seca, la mayor composición de la pulpa y la piel son alcohol-carbohidratos solubles. La pulpa contiene glucosa 35 % y fructosa 29 %, mientras que la cáscara y semilla es de 5.1 % y 8.3 % y 11.8 % respectivamente. Las fibras de la pulpa son ricas en pectina (14.4 %), la cáscara y las semillas son ricas en celulosa (2.09 %) y contiene 3.4 % de potasio (El Kossori *et al.*, 1998). En el Cuadro 7 se muestran las características de composición de la pulpa y cáscara de la tuna. La pulpa es baja en acidez y su pH es cercano a la

neutralidad; las características de la cáscara pueden ser semejantes a las de la pulpa, a diferencia de que estas tienen una cantidad menor de azúcar

Cuadro 7. Composición de la pulpa y cáscara de la tuna

Característica	Pulpa	Cáscara
pH	6.04 ± 0.34	5.52 ± 0.14
Acidez (% ácido cítrico)	0.06 ± 0.05	0.17
Sólidos solubles (°Bx a 20 °C)	13.87 ± 1.37	9.96 ± 2.36
Viscosidad (mPa•s)	129.47 ± 55.6	--
Glucosa (g•100 g ⁻¹ materia seca)	7.19 ± 1.07	2.27 ± 1.36
Fructosa (g•100 g ⁻¹ materia seca)	6.15 ± 1.86	1.8 ± 1.12
Sacarosa (g•100 g ⁻¹ materia seca)	0.08 ± 0.08	0.32 ± 0.18
Glucosa•fructosa ⁻¹	1.23 ± 0.23	1.37 ± 0.57

Fuente: Sepúlveda y Sáenz (1990).

La síntesis de ácidos ocurre principalmente a partir de azúcares. Las vitaminas solubles como la vitamina C (ácido ascórbico), se encuentra en mayor proporción en la cáscara que en el jugo (naranja). Los ácidos se degradan por respiración o por conversión en azúcar, disminuyendo durante la maduración a excepción del plátano y la piña (Gil, 2001). Algunas sales como el oxalato de calcio (muy encontrado en el nopal) y el bitartrato de potasio son importantes componentes del sabor.

Los azúcares reductores provienen del almidón cuando se trata de frutos climatéricos, o de la gluconeogénesis a partir de ácidos y lípidos, en frutos que solo acumulan azúcares hasta antes de ser cosechados. La distribución de azúcares varia, siendo la mayor concentración en la pulpa que en la cáscara y del centro del fruto a la periferia.

La calidad de los frutos depende de varios factores entre ellos tenemos que se encuentran principalmente el cultivar y de los manejos pre-cosecha que se le dan al cultivo, las condiciones ambientales y factores fisiológicos, el potencial crecimiento del fruto está determinado por la efectiva polinización (Barbera *et al.* 1994; Pimienta, 1990; Nerd *et al.*, 1991).

2.8.2 Descripción de algunos parámetros de calidad en la tuna

Madurez. La madurez de la tuna esta determinada por el contenido de sólidos solubles totales (° Bx) el cual no debe ser menor a 12 % en todas las variedades comerciales y se verifica de acuerdo a la metodología establecida por las normas mexicanas (NMX-FF-015). Para el caso de la tuna que es calificada como Calidad Suprema esta debe presentar madurez fisiológica o punto sazón.

Color. El color de la tuna debe ser correspondiente al tipo comercial, clasificándose de la siguiente manera:

Tuna blanca: Debe presentar en su cáscara un color verde-amarillo claro que cubra como mínimo el 25 % de su superficie al momento de su cosecha; además que el receptáculo de las frutas debe estar plano.

Tuna amarilla: El fruto debe presentar en su cáscara un color anaranjado pálido claro que cubra como mínimo el 25 % de su superficie al momento de la cosecha, además el receptáculo debe estar ligeramente hundido.

Tuna anaranjada: EL fruto debe presentar en su cáscara un color anaranjado que cubra como mínimo el 25 % de su superficie al momento de la cosecha.

Tuna roja: El fruto debe presentar en su cáscara un color rojo que cubra como mínimo el 25 % de su superficie al momento de su cosecha, además que el receptáculo del fruto debe ser hundido.

Porcentaje de pulpa y semilla. Los valores aceptables de porcentaje de pulpa son del 60 al 75 % del peso del fruto. Los frutos obtenidos con manejo apropiado tienen una proporción de semillas de aproximadamente 2.1 %.

2.9 Patrón de respiración

La tuna presenta un patrón respiratorio típico de un fruto no climatérico, tal como lo indican unos autores (Lakshminarayana *et al.*, 1979; Cantwell, 1995; Corrales *et al.* 1997). Las variedades sin semilla presentan consistentemente mayores tasas de respiración que las normales. Esto indica que, las tunas sin semilla presentan un metabolismo más activo, que de acuerdo con Kader (2002) tendrían menor vida de anaquel (Corrales *et al.*, 2007).

2.10 Maduración y cosecha

2.10.1 Maduración

La maduración es una serie de procesos que ocurren desde las últimas etapas de crecimiento y desarrollo hasta las primeras etapas de

senescencia, dando como resultado características estéticas y de calidad, debido a cambios en composición química, color, textura y otros atributos sensoriales (Kader, 2005).

Los frutos no climatéricos como la tuna (Kader, 2002), acumulan directamente monosacáridos durante su crecimiento y por tanto, durante la maduración no existe incrementos significativos de su tasa respiratoria; sin embargo, al igual que los frutos climatéricos sufren cambios de manera mas lenta, estos cambios son: acumulación de azúcares y de sólidos solubles, reducción de la concentración de ácidos orgánicos, cambio de color y reblandecimiento de los tejidos (Agustí, 2001) que ocurren cuando el fruto está aun vascularizado con la planta, además, estos frutos no responden a tratamientos de etileno excepto en términos de degradación de clorofila y tienen que ser cosechados completamente maduros para alcanzar el mejor sabor y dulzor (Kader, 2005).

El color es consecuencia de los pigmentos que se encuentran en mayor proporción en los frutos de tuna; los pigmentos verdes en su mayoría son clorofila, principalmente del tipo a y b ubicada en los tilacoídes de los cloroplastos. En cactáceas, los pigmentos amarillos-rojos-morado se deben a derivados de la tirosina y del indol llamados betalainas, de las cuales la betacianina aporta el color rojo oscuro (Hendry, 2003).

2.10.2 Cosecha

La cosecha de la tuna se lleva a cabo manualmente, para lo cual existen dos modalidades: a) corte con giro o torsión del fruto y b) corte auxiliado con cuchillo, la tuna se daña menos cuando se corta con cuchillo (Corrales, 2003). La época de cosecha en la zona sur inicia en la primera quincena del mes de mayo pero la bibliografía la reporta a partir de marzo, que es cuando la fruta comienza a tomar una coloración amarilla y termina en agosto; en la zona centro es de julio a septiembre; y en la región centro-norte, desde finales de agosto hasta principios de noviembre.

La cosecha para el mercado nacional normalmente se realiza arrancando la fruta mediante una torsión previa. Aunque esta práctica provoca daños en los tejidos permitiendo la incidencia de bacterias o virus que disminuyen la vida de anaquel del producto, por la rápida comercialización no influye en la buena presencia de la fruta.

Después de la cosecha, las tunas se van recolectando en recipientes de campo que generalmente son botes de lámina o cubetas de plástico. Las tunas deben depositarse en estos recipientes con todo cuidado, porque si no es así se pueden lesionar (daños mecánicos por impacto) (Corrales, 1992).

Para el mercado internacional, la cosecha se realiza cortando la fruta en la base, con herramienta como lo son cuchillos, permitiendo mayor tiempo de vida de anaquel, por lo que se considera la práctica más recomendable.

2.10.3 Desespinado

El desespinado consiste en remover los aguates del fruto, lo que resulta absolutamente necesario para poderlo comercializar. Esta operación se puede realizar en forma manual o mecánica (Corrales, 2003). El desespinado mecánico (cepillado) de la fruta afecta adversamente la conservación de la calidad e incrementa la tasa de pérdida de agua y las pudriciones (Testoni y Eccher, 1990, citados por Inglese *et al.*, 2002). En algunas regiones productoras del centro y sur de México, esta operación aún se realiza en forma manual, barriendo al fruto con ramas o escobas hasta eliminar los aguates totalmente, para ello, las tunas se extienden sobre el pasto y se dejan secar al sol hasta que se evapora el rocío para facilitar la remoción de los aguates, de lo contrario, éstos se quedan adheridos al agua del rocío y al fruto (Corrales, 2003).

2.10.4 Encerado

Consiste en aplicar una emulsión de cera a las tunas (después del desespinado) ya sea por inmersión o aspersión. Los recubrimientos con base en emulsiones de ceras se han venido utilizando desde hacia varios años con el propósito de controlar la pérdida de agua por transpiración, disminuir la intensidad de los cambios propios de la maduración y/o senescencia, como la respiración, y proporcionar un mejor aspecto visual a los frutos (mayor brillo), (Hall, 1981, citado por Corrales, 2003).

2.10.5 Selección y empaque

La tuna se selecciona por calidad y tamaño. La selección por calidad deben de realizarla personas que estén suficientemente capacitadas para reconocer y separar frutos con daños mecánicos, podridos o malformados. La finalidad de empacar la tuna es proporcionar al producto las condiciones adecuadas para que durante el transporte al mercado no se dañe (Corrales, 2003). La envoltura individual en papel muy delgado, pero resistente (tissue paper) da mayor protección y presentación al producto, además de que se conserva en mejores condiciones y disminuye el contagio de pudriciones entre los frutos (Corrales, 2003).

2.10.6 Almacenamiento y transporte

En tunas, como en la mayoría de las frutas, el factor más importante para reducir su deterioro es la temperatura baja, sin embargo, la frigoconservación de tuna también puede causar daños por frío, dependiendo de algunos factores, como la temperatura, el tiempo de exposición y la variedad (Chávez y Saucedo, 1985).

2.11 Tecnología postcosecha

El manejo postcosecha que se le da a estos productos es y ha sido desde el principio muy sencillo y poco tecnificado, sin embargo, el esquema productivo ha crecido y los sistemas de distribución y de comercialización se han complicado; solamente algunas explotaciones comerciales en México (especialmente aquellas que comercializan sus productos en el mercado de

exportación) y las de otros países como Italia, Estados Unidos y Chile, han desarrollado tecnológicamente este manejo (Corrales, 2003).

En la postcosecha de tuna se incluyen dos grandes aspectos que siempre van relacionados: la fisiología y la tecnología. La primera aborda aspectos del funcionamiento biológico de los productos en postcosecha (cambios morfológicos, bioquímicos y metabólicos); la segunda tiene que ver con el manejo tecnificado de los productos, considerando su fisiología, su naturaleza perecedera y, además, las exigencias comerciales para mantener al máximo posible sus atributos de calidad al mínimo costo (Corrales, 2003).

2.11.1 Fisiología postcosecha de la tuna

La fisiología postcosecha de la tuna es un proceso que da continuidad a los procesos fisiológicos de precosecha, es decir, a la fisiología del desarrollo del fruto. La tuna es un fruto no climatérico con baja respiración ($15-20 \text{ mL CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ a 20°C) y baja velocidad de producción de etileno (Lakshminarayana y Estrella 1978; Lakshminarayana *et al.* 1979; Cantwell 1995).

Los cambios postcosecha de las características internas como son el pH, acidez titulable, sólidos solubles, concentración de acetaldehído y producción de etileno son bajos, así como el ácido ascórbico puede decrecer dependiendo de las condiciones de almacenamiento (Inglese *et al.* 2002). La vida postcosecha del fruto es relativamente corta. Bajo condiciones de vida

de anaquel la tuna puede deteriorarse en pocas semanas (Inglese *et al*, 2002).

Cantwell (1995) concluyó que en los frutos de tuna el contenido final de azúcar se determina esencialmente en función del momento de la cosecha, en virtud de que los cambios en los azúcares en postcosecha son muy pequeños.

La firmeza de los frutos de tuna (medida en la cáscara, después de remover la cutícula) fue disminuyendo lentamente durante un mes de almacenamiento a 20 °C (Cantwell, 1986, mencionado por Corrales, 2003). En general, los cambios postcosecha en la firmeza de la tuna son menores a los que presentan otros frutos (Tucker, 1993, mencionado por Corrales, 2003). Para el caso de la pérdida de peso en postcosecha, estas, se deben principalmente a pérdidas de agua por transpiración. En el caso particular de la tuna si estas llegan a ser mayor del 8 % su aspecto se ve deteriorado por marchitez o arrugamiento, al grado de que los frutos dejan de ser atractivos para el consumidor (Corrales, 2003).

En cuanto al cambio de color, Franco y Rodríguez (1997) encontraron que después de 10 días de almacenamiento al medio ambiente las variedades denominadas "blancas" presentaron un incremento del ángulo de tono (Hue), las variedades denominadas "anaranjadas" y "rojas" presentaron una disminución del ángulo de tono, es decir, que se tornaron más rojas (Corrales, 2003).

La tasa de respiración que presenta la tuna en postcosecha es relativamente baja, en comparación con la que presentan otros frutos y además tiende a declinar, por lo que este fruto ha sido caracterizado como no climatérico (Alvarado, 1978; Laksminarayana, 1978; Cantwell, 1995, mencionados por Corrales, 2003).

La producción de etileno en las tunas es muy baja (varían desde 0.10 a $0.26 \text{ nl} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) y resulto similar para frutos cosechados en tres diferentes estados de maduración.

Cantwell (1995) indica que la tuna cosechada en cualquiera de los estados, verde, intermedio o completamente maduro, produce niveles similares de CO_2 , pero, cuando las frutas se remueven del almacenamiento refrigerado y se colocan en condiciones que simulan la exposición para la venta, usualmente se detectan incrementos agudos en las tasas de respiración y producción de etileno (Schirra *et al.*, 1997).

2.11.2 Producción de metabolitos anaerobios: acetaldehído y etanol

Durante la maduración del fruto en el árbol y después de la cosecha algunos procesos esenciales involucran la producción de los metabolitos anaerobios, acetaldehído y etanol. Estos procesos incluyen de producción de volátiles del aroma y remoción de la astringencia del fruto. Acetaldehído, un componente natural del aroma, está presente en casi todos los frutos; este se acumula durante la maduración bajo condiciones aeróbicas, pero es mucho mayor, parcial o totalmente en condiciones anaeróbicas.

Parcialmente en condiciones anaeróbicas, con frecuencia ocurre durante la maduración del fruto y bajo condiciones de almacenamiento, por ejemplo, a través de la cubierta con ceras u otras películas, o en atmósfera modificada y atmósferas controladas (Pesis, 2005).

De acuerdo a Pesis (2005) un requerimiento de metabolitos anaerobios en la maduración normal provee la indicación inicial de que la aplicación de tales metabolitos anaerobios puede ser benéfica para postcosecha en calidad de frutos. En algunos frutos encontró que la aplicación de etanol o acetaldehído solo puede afectar la maduración del fruto, por ejemplo, en higos (induce la maduración), plátano y parsimonia (remueve la astringencia) y uva (incrementa las antocianinas). En el periodo postcosecha los metabolitos anaerobios pueden ser aplicados para inducir la producción de volátiles y mejorar el aroma del fruto.

En adición a lo anterior, ha sido encontrado que acetaldehído tiene un efecto fungicida y actividad insecticida. Acetaldehído y etanol han mostrado ser capaces de retardar la senescencia e inhibir la producción de etileno en plantas, teniendo menos síntomas de daños por frío en varios frutos.

Rodríguez y Félix *et al.* (1992) encontraron que la pérdida de agua de cerca del 8 % afecta en promedio la vida de anaquel de la tuna. La colecta de la tuna implica la remoción de las gloquidias (espinas) afectando significativamente la calidad del fruto e incrementa la velocidad de pérdida de agua y el deterioro. (Testoni y Eccher, Zerbini 1990).

2.11.3 Tecnología postcosecha

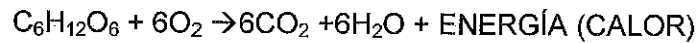
La postcosecha comienza al momento de la separación de la parte comestible que produce la planta y el período postcosecha termina cuando el alimento llega a posesión del consumidor final. Las plantas o parte de las plantas continúan su función metabólica después de la cosecha. Su metabolismo no es igual que cuando estaban en la planta y estos están sujetos a deterioros patológicos y fisiológicos y pérdidas (Fallik y Aharoni, 2004). Las causas de las pérdidas pueden ser biológicas, microbiológicas, químicas, reacciones bioquímicas, mecánicas, físicas, fisiológicas y patológicas. Los factores microbiológicos, mecánicos y fisiológicos son los que causan más pérdidas en cultivos perecederos (Kader, 1992). La vida de anaquel se define como un período de tiempo a partir de la cosecha hasta la manufactura para el consumo, este se ve afectada por factores intrínsecos como la respiración, estructura biológicas, producción y sensibilidad al etileno, transpiración, cambios composicionales, procesos de desarrollo y rompimientos fisiológicos (Irtwange, 2006).

2.12 Manejo de atmósferas modificadas

2.12.1 Velocidad de respiración

La respiración es un proceso por el cual los materiales orgánicos almacenados (carbohidratos, proteínas y grasas) son convertidos en compuestos simples y en productos y liberación de energía. El oxígeno (O_2) es utilizado en este proceso y el dióxido de carbono (CO_2) es producido. Bajo condiciones atmosféricas normales, toma lugar la respiración aeróbica, lo

cual da como resultado la oxidación metabólica de la glucosa, y se describe por la siguiente ecuación:



La energía relacionada con el calor, afecta las consideraciones tecnológicas de postcosecha. La velocidad de deterioro de los frutos en postcosecha es proporcional a la velocidad de respiración (Fallik y Aharoni, 2004). La relación de CO_2 producido con el O_2 consumido, se conoce como coeficiente respiratorio (CR) y normalmente toma el valor de 1, pero el rango puede ir de 0.7-1.3 dependiendo del sustrato metabólico utilizado (Irtwange, 2006).

La resistencia de los tejidos de las plantas a la difusión de O_2 y CO_2 , etileno y vapor de agua es dependiente de la estructura biológica de los frutos y vegetales en individual. La resistencia a la difusión de gases depende de los bajos niveles de O_2 y altos niveles de CO_2 (Pesis, 2004).

A lo largo de esta última década se han logrado diferenciar dos técnicas de envasado de frutas y hortalizas que permiten alargar la vida útil de los productos sin detrimento de sus cualidades organolépticas. Estas dos técnicas son el envasado en atmósferas controladas (EAC) y el envasado en atmósferas modificadas (EAM). (Hertog, *et al.*, 1998). Ambas técnicas suponen el cambio de la atmósfera que rodea a los alimentos por aire con una composición distinta a la del aire normal. Generalmente se reduce el contenido de oxígeno y se aumenta el contenido de CO_2 . Los métodos que

se utilizan para ello son los de flujo de gas (métodos de barrido) y la evacuación seguida de introducción de gas nuevo (Lee, *et al.*, 1991).

El empaquetado en atmósferas modificadas (EAM) es una técnica usada para extender la vida de anaquel de productos frescos dentro de un empaque permeable, EAM reduce la velocidad de respiración y producción de etileno, retarda el ablandamiento y cambios que ocurren en el producto, por la creación y mantenimiento de una optima microatmósfera (usualmente reduce O_2 y se eleva los niveles de CO_2) dentro del empaque.

Una microatmósfera deseada puede ser establecida por llenado al tope del espacio libre del empaque con una mezcla deseada y la atmósfera se mantiene controlando la entrada de O_2 y la salida de CO_2 con una propia permeabilidad del empaque seleccionado. El desarrollo de la microatmósfera puede además ser establecida, a una velocidad baja, esto se logra mediante el equilibrio alcanzado entre la respiración del fruto y la atmósfera externa que rodea al fruto. En cada caso, la dinámica de la atmósfera depende del producto (peso y velocidad de respiración), el empaque (espesor y permeabilidad de la película plástica, volumen libre, y área superficial del empaque) y del ambiente (composición de los gases del ambiente y de la temperatura de almacenamiento) (Lee, *et al.*, 1991). En el envasado en atmósfera modificada se procura reducir al máximo el contenido en oxígeno para disminuir el deterioro de los productos por oxidación. El nitrógeno se caracteriza por ser un gas inerte. La utilización del N_2 evita el colapso de los

2.12.2 Permeación de las películas plásticas

Las primeras observaciones que indicaban que los gases logran atravesar una película plástica datan de mediados del siglo XIX. Asimismo, relatan que se observaba que la película ejercía un proceso de selectividad al permitir el flujo de algunos compuestos gaseosos con mayor velocidad y no permitir el de otros compuestos, a este fenómeno se le llamo PERMEACIÓN y se estableció que se lleva acabo un fenómeno de solución-difusión, es decir, un proceso en el cual un gas se disuelve primero en el polímero y posteriormente fluye a través de él por un fenómeno similar a las difusión de líquidos (Koros y Chern, 1987; Kester y Fennema, 1986; Valle, 1995; Amarante y Banks, 2001).

La combinación de la primera Ley de Fick (que describe el mecanismo de difusión) y la Ley de Henry (que describe los procesos de solubilización de gases en líquidos) permite obtener una expresión de cálculo de un flujo de permeación de una especie química j a través de la película plástica (r_j en $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$), y se muestra en la siguiente Ecuación (1) (Valle, 1995).

$$r_j = \frac{\bar{P}_j A_p (p_j^e - p_j^c)}{\delta} \quad (1)$$

Donde $\bar{P}_j$ es el coeficiente de permeabilidad ($\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$) definido como el producto de un coeficiente de difusión ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) y un coeficiente de solubilidad ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$) (Koros y Chern, 1987). Asimismo, A_p es el área superficial de la película plástica (m^2), δ es su espesor (m), p_j^e es la presión parcial (Pa) de la especie gaseosa j en la atmósfera externa y p_j^c es la

presión parcial (Pa) del mismo gas en la atmósfera circundante. El coeficiente de permeabilidad es el parámetro que expresa la capacidad de un material polimérico para transferir un gas desde un ambiente de alta presión parcial (alta concentración) hasta otro de baja presión parcial (baja concentración).

2.12.3 Modelado de la velocidad de respiración en frutas y hortalizas frescas

Se han desarrollado diversos modelos empíricos con el fin de comprender este tipo de tecnología aplicado a la conservación de frutas y hortalizas, dichos modelos fuertemente relacionados con la cinética química, tal es el caso de la ecuación de Arrhenius (Yang y Chinan, 1988) hasta el modelado de Michaelis-Menten (Lee *et al.*, 1991). Desde principios de los 60's muchas investigaciones se desarrollaron para modelar la dinámica de la microatmósfera en sistemas de EAM. Jurin y Karel (1963) desarrollaron un método gráfico para determinar el equilibrio de las concentraciones de O_2 y CO_2 dentro del empaque permeable. Veeraju y Karel (1966) desarrollaron un método analítico utilizando dos películas plásticas con diferente permeabilidad para controlar las concentraciones de O_2 y CO_2 independientemente. Henig y Gilbert (1975) derivaron dos ecuaciones diferenciales simultáneas de primer grado con balance de O_2 y CO_2 , solucionándolo mediante métodos numéricos simulando la transferencia de gases en un empaque, y analizaron el efecto de varios empaques variables en composición del gas en función del tiempo. Hayakawa *et al.* (1975) modificaron la ecuación de Henig y Gilbert (1975) y obtuvieron soluciones

analíticas para el modelado de los parámetros del empaque. Todos los métodos mencionados requieren velocidades experimentales de respiración como una función de las concentraciones de O_2 y CO_2 .

Do y Sulanke (1984) describieron ampliamente los efectos metabólicos en frutas y verduras sometidas a atmósferas modificadas entre las que destacan: retraso de la degradación de la clorofila, la disminución de la tasa de degradación de compuestos pépticos insolubles, incremento del contenido de azúcares, formación de acetaldehído y principalmente se disminuye la velocidad de respiración. Citado por (Lee, *et al*, 1991).

Chevillote (1973) fue quien introdujo la ecuación de Michaelis-Menten para describir el fenómeno de respiración. Citado por (Lee, *et al*, 1991), incluyeron una inhibición incompetitiva por el CO_2 . Peppelenbos y Van't Leven (1996), evaluaron cuatro tipos de inhibiciones para modelar la influencia del CO_2 y probaron el modelo en brócoli cortado.

El modelo de respiración basado en la cinética enzimática, fue propuesto para predecir la velocidad de respiración del producto fresco como función de la concentración de O_2 y CO_2 .

La difusión de gases y la velocidad de respiración son dos principales procesos que afectan la atmósfera del empaque, la ley de difusión de Fick se encontró que gobierna el intercambio de gases en la mayoría de frutos (Burg y Burg, 1965). La respiración de frutas y vegetales fueron tratados en

términos de la cinética enzimática por Burton (1978) y Tucker y Laties (1985). Varias investigaciones se han realizado.

2.12.4 Aplicación de la teoría de la cinética enzimática de Michaelis-Menten para caracterizar la respiración de productos frescos.

El modelo de respiración basado en la cinética enzimática, fue propuesto para predecir la velocidad de respiración del producto fresco como función de la concentración de O_2 y CO_2 . En este modelo, la dependencia de respiración en O_2 fue asumida para seguir el modelo de Michaelis -Menten con el formato de la Ecuación (2):

$$r = \frac{V_m [O_2]}{K_m + [O_2]} \quad (2)$$

donde [r = Velocidad de respiración ($mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$ ó $mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$)], [V_m = Velocidad máxima de respiración ($mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$ ó $mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$)], [$[O_2]$ = Concentración de oxígeno %], [K_m = Constante de Michaelis-Menten (% O_2)], y el efecto del CO_2 en la respiración siguiendo un modelo de inhibición acompetitiva (Ecuación 3):

$$r = \frac{V_m [O_2]}{K_m + \left(1 + \frac{[CO_2]}{K_i}\right) [O_2]} \quad (3)$$

donde [r = Velocidad de respiración ($mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$ ó $mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$)], [V_m = Velocidad máxima de respiración ($mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$ ó $mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$)], [$[O_2]$ = Concentración de oxígeno %], [K_m = Constante de Michaelis-Menten (%

O_2)), $[K_i]$ = Inhibición constante (% O_2)), $[CO_2]$ = Concentración de dióxido de carbono (%).

El desarrollo de una microatmósfera puede establecerse rápidamente por la liberación de espacio libre del empaque con un desarrollo de mezcla de gas y el mantenimiento de la atmósfera controlando la afluencia de CO_2 y efluencia de CO_2 con una propiedad selectiva de la permeabilidad (Lee, *et al*, 1991).

El diseño de empaque de una atmósfera modificada (EAM), depende de un cierto número de variables: las características del producto, la composición de la atmósfera modificada, la permeabilidad del empaque a los gases, la temperatura del producto, la velocidad de respiración del producto. La velocidad de respiración es el punto central para poder diseñar una atmósfera modificada, para productos frescos y vegetales.

La respiración juega un papel central en todo el metabolismo de las plantas, además a menudo se utiliza como una medición general de la velocidad del metabolismo. La ecuación de Michaelis-Menten (MM), es mundialmente utilizada para describir la relación entre la concentración del O_2 y la velocidad de consumo del O_2 .

El efecto producido por el O_2 puede explicarse con base en el desarrollo de varios procesos del metabolismo del producto y el más importante se refiere a la actividad de la cadena transportadora de electrones que se produce

como parte del proceso respiratorio en el interior de la mitocondria, es decir, el transporte de electrones se lleva acabo en la membrana interna de este organelo, culmina con la transferencia de dos de ellos al complejo citocromo-oxidasa, que eventualmente reduce el oxígeno para formar agua (Elthon y Stewart, 1983; Valle, 2003); al reducirse la disponibilidad del gas se propicia la reducción de la velocidad del transporte mencionado y, en consecuencia, también del proceso respiratorio en general (Taiz y Zeiger, 1998). La reducción de la disponibilidad de O_2 también afecta la producción de etileno pues en la ruta de biosíntesis la conversión de ACC en C_2H_4 ocurre en presencia de O_2 (Zacarías, 1993). Para el caso del CO_2 se ha observado que la presencia de concentraciones altas induce una reducción de la actividad de enzimas del ciclo de Krebs (Mathooko, 1996).

Para algunos productos, las concentraciones de O_2 y CO_2 influncian sobre la calidad y la vida de anaquel. A altas concentraciones de CO_2 , la calidad del producto se ve reducida. Esto a menudo se explica como una influencia del CO_2 en la actividad de las enzimas en la glicólisis y el ciclo de Krebs (Bendall *et al.*, 1973; Peppelenbos *et al.*, 1996). Peppelenbos (1996) menciona una directa competencia del CO_2 con la deshidrogenasa succínica, también menciona que el efecto del CO_2 en muchas enzimas se atribuye al cambio en el pH debido a la acumulación del CO_2 , esta explicación también fue propuesta 3 años atrás por Hess *et al.*, 1993, quien encontró que un efecto indirecto del CO_2 en el ATP y la PPI-fosfofructoquinasa debido al cambio en el pH.

El empaçado con película de polietileno termocontraíble reduce la pérdida de peso, disminuye el daño por frío y resulta en una mejor apariencia pero no reduce el deterioro durante 6 semanas de almacenamiento a 6 °C y su subsiguiente mercadeo a 20 °C (Piga *et al.* 1997). La tuna envuelta con película de poliolefina conserva la frescura del fruto y reduce grandemente la pérdida de peso durante 4 semanas de almacenamiento a 9 °C y su subsiguiente mercadeo (Piga *et al.* 1997).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3. 1. Organización general de la investigación

3.1.1. Material vegetal.

Se utilizaron frutos de tuna blanca (*Opuntia albicarpa*) en estado de madurez comercial, cosechados y desespinaos mecánicamente en San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, México, en los meses de agosto (fase uno) y octubre (fase dos) de 2007 (Figura 1). El material se trasladó el mismo día de la cosecha al Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo, donde se efectuó la experimentación.



Figura 1. Zona productora de tuna blanca, en San Felipe Teotitlán, Estado de México.

3.1.2. Fases de investigación

Se realizaron tres fases de investigación. En la primera, se caracterizó la actividad respiratoria de los frutos mediante la teoría de la cinética

enzimática de Michaelis-Menten a 20 y a 8 °C. La primera temperatura se consideró representativa de condición ambiental y la segunda de un almacenamiento refrigerado. En la segunda fase se definieron los parámetros de operación adecuada de un sistema de atmósfera modificada (AM) para la conservación de frutos de tuna blanca a 20 y a 8 °C, mediante rutinas de balance de materiales. En la tercera, se instaló un almacenamiento en AM para la evaluación de los cambios fisiológicos, físicos y químicos que experimenta un fruto de tuna blanca en tales condiciones.

3.2. Fase de investigación uno

3.2.1. Caracterización respiratoria

Se formaron 12 lotes de frutos con peso de 1.64 (± 0.07) kg y volumen de 1.56 (± 0.06) L, los cuales se colocaron en recipientes de 3.21 L de capacidad. Seis de estos lotes se manejaron a 20 °C y los seis restantes a 8 °C. Asimismo, en cada condición térmica tres de los recipientes contuvieron tres sacos hechos con tela peyón con 50 g de cal cada uno, los cuales cumplieron la función de absorber el CO₂ emitido por los frutos para permitir la evaluación del efecto de este gas sobre la actividad respiratoria de los mismos. Bajo esta organización se tuvo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2², donde uno de los factores fue la temperatura (20 y 8 °C) y el otro el CO₂ (ausente y presente). La unidad experimental fue un lote de frutos y se tuvieron tres repeticiones.

El manejo de cada lote se realizó en la siguiente forma: se cerró el recipiente en forma hermética y se registraron las concentraciones de O₂ y CO₂ a intervalos de 2 h por un período de 30 h. En cada corrida se determinó el peso de los frutos y el volumen libre en el recipiente. Los datos resultantes consistieron en cinéticas de cambio de concentración de O₂ y CO₂ en el interior del recipiente en función del tiempo, las cuales se ajustaron mediante regresión a modelos con el formato de las Ecuaciones (4) y (5), donde y_{O_2} y y_{CO_2} son concentraciones (%) de los gases, t es tiempo (h) y los parámetros $y_{O_2}^o$ (%), $y_{CO_2}^o$ (%), a_o (%), a_c (%), b_o (h⁻¹) y b_c (h⁻¹), son constantes de regresión.

$$y_{O_2} = y_{O_2}^o + a_o [1 - \exp(-b_o t)] \quad (4)$$

$$y_{CO_2} = y_{CO_2}^o + a_c [1 - \exp(-b_c t)] \quad (5)$$

En cada cinética ajustada se aplicó un método de pendientes para encontrar la relación entre las concentraciones prevalecientes de O₂ y CO₂ con las velocidades de consumo de O₂ y producción de CO₂. El período total de evaluación se dividió en intervalos iguales de 1 h; para cada intervalo se determinaron las concentraciones iniciales y finales de O₂ y CO₂ y se obtuvieron valores de consumo y producción de estos gases (g_{O_2} y g_{CO_2} , ambos en kg_{gas} kg⁻¹ s⁻¹), así como el cociente respiratorio (C_r , adimensional), con apoyo de las Ecuaciones (6) a (8) (Valle, 2003):

$$g_{O_2} = \frac{(y_{O_2}^i - y_{O_2}^f) V_L P_{tot} M_{O_2}}{m_p t_r R (T + 273.15)} \quad (6)$$

$$g_{CO_2} = \frac{(y_{CO_2}^f - y_{CO_2}^i) \cdot V_L \cdot p_{tot} \cdot M_{CO_2}}{m_{fr} \cdot t_r \cdot R(T + 273.15)} \quad (7)$$

$$C_r = \frac{g_{CO_2}}{g_{O_2}} \quad (8)$$

donde $y_{O_2}^f$ y $y_{O_2}^i$, son las concentraciones (fracción volumen) final (superíndice f) e inicial (superíndice i) de O_2 en el recipiente, respectivamente; $y_{CO_2}^f$ y $y_{CO_2}^i$ son las correspondientes a CO_2 , V_L es el volumen libre (m^3) en el mismo; p_{tot} es la presión total (presión atmosférica, 77993.0 Pa); T es la temperatura ($^{\circ}C$); R es la constante del gas ideal ($8314.4 \text{ Pa} \cdot m^3 \cdot kg_{mol}^{-1} \cdot K^{-1}$); m_{fr} es la masa de los frutos (kg); t_r es el tiempo (s) del intervalo de evaluación, M_{O_2} y M_{CO_2} son pesos moleculares de O_2 ($32 \text{ kg}_{masa} \cdot kg_{mol}^{-1}$) y CO_2 ($44 \text{ kg}_{masa} \cdot kg_{mol}^{-1}$). En cada intervalo se obtuvo un valor promedio de concentración, y todas las concentraciones de O_2 y CO_2 se expresaron como presiones parciales (p_{O_2} , p_{CO_2} ; 1 Kpa es equivalente a 1.282 % a la presión atmosférica de 77.993 kPa).

Los datos de O_2 de cada corrida se ajustaron a un modelo de Michaelis-Menten con el formato de la Ecuación (9), trabajada en el formato linealizado de la Ecuación de Lineweaver-Burk (Ecuación 10), de donde se obtuvieron los parámetros de consumo máximo aparente de O_2 ($g_{O_2,ap}^{max}$, $kg_{gas} \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$) y constante de Michaelis-Menten aparente ($K_{M,ap}$, kPa) (Lehninger, 1998):

$$g_{O_2} = \frac{g_{O_2,ap}^{max} \cdot p_{O_2}^r}{K_{M,ap} + p_{O_2}^r} \quad (9)$$

$$\frac{1}{g_{O_2}} = \left(\frac{K_{M,ap}}{g_{O_2,ap}^{\max}} \right) \left(\frac{1}{p_{O_2}^r} \right) + \left(\frac{1}{g_{O_2,ap}^{\max}} \right) \quad (10)$$

Las pendientes de la rectas de Lineweaver-Burk $(K_{M,ap}/g_{O_2,ap}^{\max})$ y los parámetros aparentes de Michaelis-Menten $(g_{O_2,ap}^{\max}, K_{M,ap})$ se sometieron a un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey, 0.05), en un arreglo factorial 2^2 , para analizar el efecto de la temperatura y la presencia de CO_2 en el ambiente de los frutos, donde un factor fue la temperatura (20 y 8 °C) y el otro el CO_2 (ausente y presente). El resultado de este ejercicio fue la selección de un modelo de Michaelis-Menten para representar la actividad respiratoria de los frutos entre cuatro posibilidades (consumo de O_2 sin efecto del CO_2 , con efecto competitivo, con efecto acompetitivo o con efecto no-competitivo) (Lehninger, 1998). El modelo resultante fue del tipo acompetitivo, cuyo formato es el de la Ecuación (11):

$$g_{O_2} = \frac{g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^r}{K_M + p_{O_2}^r \left(1 + \frac{p_{CO_2}^r}{K_a} \right)} \quad (11)$$

Donde K_a es la constante acompetitiva (kPa) que explica el efecto de la presencia de CO_2 sobre la actividad respiratoria de los frutos y $g_{O_2}^{\max}$ ($kg_{gas} \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$) y K_M (kPa) son los parámetros absolutos (ya no aparentes) de Michaelis-Menten de los mismos.

De acuerdo con Hertog *et al.* (1998), la relación entre los parámetros aparentes y absolutos de Michaelis-Menten está dada por la Ecuación (12), de donde se deriva la Ecuación (13):

$$g_{O_2,ap}^{max} = \frac{g_{O_2}^{max}}{1 + \frac{p_{CO_2}^r}{K_a}} \quad (12)$$

$$\frac{1}{g_{O_2,ap}^{max}} = \left(\frac{1}{g_{O_2}^{max} K_a} \right) (p_{CO_2}^r) + \left(\frac{1}{g_{O_2}^{max}} \right) \quad (13)$$

Según el formato de la Ecuación (13), si se grafica el inverso del consumo aparente máximo de O_2 ($1/g_{O_2,ap}^{max}$) como función de la concentración de CO_2 en el recipiente ($p_{CO_2}^r$) se obtiene una línea recta donde la ordenada al origen es ($1/g_{O_2}^{max}$) y la pendiente es ($1/g_{O_2}^{max} K_a$). De esta forma, a partir de la ordenada al origen se obtiene el consumo máximo absoluto de O_2 ($g_{O_2}^{max}$) y después de combinar este valor con el de la pendiente se obtiene el de la constante acompetitiva (K_a).

En cada condición térmica (20 y 8 °C) se tuvieron tres repeticiones. En cada repetición se tuvo un lote con CO_2 y un lote sin CO_2 . Entonces, para cada repetición se realizó el cálculo de $g_{O_2}^{max}$ y K_a (absolutos). Sin embargo, la estructura experimental empleada en el presente trabajo, causó que en cada corrida no se tuviera sólo un valor de concentración de CO_2 sino muchos, en una funcionalidad con el tiempo. Por esta razón, para cada repetición se construyó una funcionalidad entre la constante K_a y la concentración de CO_2

($p_{CO_2}^r$). Así, los dos valores de $g_{O_2,ap}^{max}$ de cada repetición se probaron para varios valores de $p_{CO_2}^r$, en el rango de las corridas experimentales y se construyó para cada repetición un modelo con el formato de la Ecuación (14), donde a es una constante de regresión (adimensional) y donde se aceptó que en esta función la ordenada al origen es nula en ausencia de CO_2 :

$$K_a = a p_{CO_2}^r \quad (14)$$

Por otro lado, de acuerdo con Hertog *et al.* (1998) para el modelo acompetitivo se cumple la relación expresada por la Ecuación (15):

$$\left(\frac{g_{O_2,ap}^{max}}{K_{M,ap}} \right) = \left(\frac{g_{O_2}^{max}}{K_M} \right) \quad (15)$$

En tal contexto, con el valor de $g_{O_2}^{max}$ (absoluto) ya conocido y los datos de $g_{O_2,ap}^{max}$ y $K_{M,ap}$ de la repetición, se calculó para esta última el valor correspondiente de la constante de Michaelis-Menten absoluta (K_M).

Por otro lado, con los datos de $g_{O_2}^{max}$, K_M (absolutos) y el valor promedio del cociente respiratorio (C_r) obtenido con la Ecuación (8) se construyó un modelo para la producción de CO_2 (g_{CO_2} ; $kg_{gas} \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ ó $mL_{gas} \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$) con el formato de la Ecuación (16):

$$g_{CO_2} = \frac{C_r g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^r}{K_M + p_{O_2}^r \left(1 + \frac{p_{CO_2}^r}{K_a}\right)} \quad (16)$$

El **análisis de los datos** de esta fase se realizó mediante análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey, 0.05), conducidos mediante el programa SAS (SAS Institute Inc., 1989) y acordes con un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2^2 , donde uno de los factores fue la temperatura (20 y 8 °C) y el otro el CO_2 (ausente y presente). La unidad experimental fue un lote de frutos y se tuvieron tres repeticiones.

3.2.2. Validación del modelado del comportamiento respiratorio.

Se aplicaron balances de materia en régimen estacionario al contenido gaseoso de los recipientes de prueba. La Figura 2 esquematiza uno de los recipientes herméticos. Estos últimos se consideraron impermeables a gases, de tal forma que no había intercambio gaseoso con el ambiente externo y, en tal sentido, el cambio de concentración se debió sólo a la interacción de los frutos con el ambiente del interior del recipiente correspondiente. El resultado de estos balances fueron las Ecuaciones (17) y (18) que describieron, respectivamente, los cambios de O_2 y CO_2 :

$$\frac{dp_{O_2}^r}{dt} = - \left[\frac{R(T + 273.15)}{V_L M_{O_2}} \right] \left[\frac{m_{fr} g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^r}{K_M + p_{O_2}^r \left(1 + \frac{p_{CO_2}^r}{K_a}\right)} \right] \quad (17)$$

$$\frac{dp_{CO_2}^r}{dt} = \left[\frac{R(T + 273.15)}{V_L M_{CO_2}} \right] \left[\frac{m_{fr} C_r g_{O_2}^{max} p_{O_2}^r}{K_m + p_{O_2}^r \cdot \left(1 + p_{CO_2}^r / K_a \right)} \right] \quad (18)$$



Figura 2. Montaje de primera fase de investigación.

Estas ecuaciones se programaron en una hoja electrónica de Microsoft Excell® con apoyo del método de Runge-Kutta de Cuarto Orden (Burden y Faires, 1986) y de esa forma se simuló el cambio de concentración de O_2 y CO_2 en el interior de los recipientes. Estos datos simulados se compararon con los datos experimentales y la falta de significancia en la diferencia entre ambos conjuntos permitió aceptar el modelado hecho como válido.

3.3. Fase de investigación dos

En esta fase se determinaron los parámetros de operación adecuada de un sistema de atmósfera modificada (AM) para conservar frutos de tuna blanca. Para ello, se caracterizó, mediante modelado apoyado en balance de materiales, la operación de una AM pasiva, la cual contempla dos etapas, una en régimen transitorio, donde las concentraciones de O_2 y CO_2 cambian con el tiempo, y otra posterior en régimen estacionario, donde dichas

concentraciones alcanzan valores constantes y se mantienen así a lo largo del tiempo. Para dar claridad a la descripción metodológica, en lo sucesivo se denominará atmósfera circundante a la mezcla gaseosa que rodea a los frutos dentro del envase plástico y atmósfera externa a la mezcla gaseosa que se localiza en el exterior de dicho envase.

3.3.1. Modelado de la operación de una AM.

En una AM pasiva, a partir del cierre hermético del envase plástico se inician dos tipos de interacción; por un lado, debido a su actividad metabólica, los frutos interactúan con la atmósfera circundante consumiendo O_2 y liberando CO_2 (Svetlana, 1995; Fonseca, 2002) (Figura 3A).

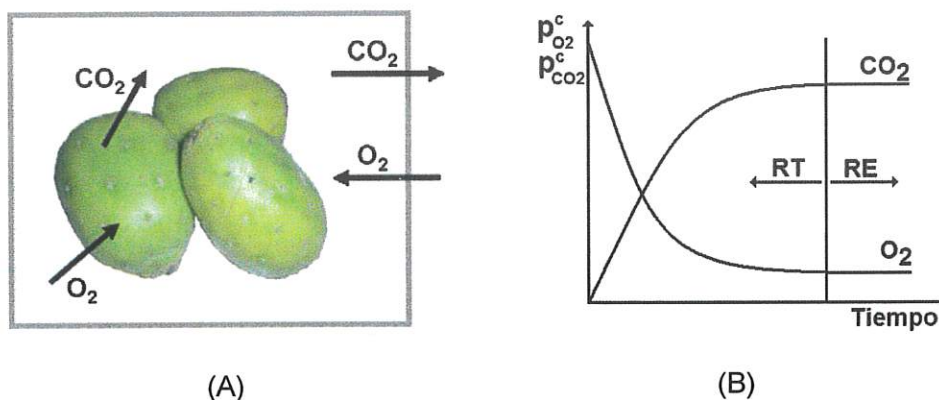


Figura 3. (A). Interacciones (fruto)-(atmósfera circundante) y (atmósfera circundante)-(atmósfera externa) en un sistema de atmósfera modificada. El recuadro sombreado que rodea los frutos esquematiza la película plástica de envase. (B) Variación de concentración de O_2 y CO_2 en la instalación de una atmósfera modificada. RT: fase de régimen transitorio; RE: fase de régimen estacionario.

Las velocidades a las cuales el O₂ es consumido y el CO₂ es liberado están dadas por las Ecuaciones (19) y (20), donde el superíndice "r" de las Ecuaciones (11) y (16) se ha sustituido por un superíndice "c" para dar claridad que se hace referencia a la atmósfera circundante:

$$g_{O_2} = \frac{g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^c}{K_M + p_{O_2}^c \left(1 + \frac{p_{CO_2}^c}{K_a} \right)} \quad (19)$$

$$g_{CO_2} = \frac{Cr g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^c}{K_M + p_{O_2}^c \left(1 + \frac{p_{CO_2}^c}{K_a} \right)} \quad (20)$$

Esta primera interacción genera una diferencia creciente de concentración de O₂ y CO₂ entre la atmósfera circundante y la atmósfera externa (Figura 3B), donde el O₂ y el CO₂ resultan menor y mayor, respectivamente, en la atmósfera circundante en relación a la atmósfera externa. Estos gradientes activan el segundo tipo de interacción, que consiste en el intercambio de estos gases entre las dos atmósferas a través del plástico de envase (Figura 3A), cuya magnitud está dada por las Ecuaciones (21) y (22) (Banks *et al.*, 1995).

$$r_{O_2} = \frac{\bar{P}_{O_2} A_p (p_{O_2}^e - p_{O_2}^c)}{\delta} \quad (21)$$

$$r_{CO_2} = \frac{\bar{P}_{CO_2} A_p (p_{CO_2}^c - p_{CO_2}^e)}{\delta} \quad (22)$$

donde r_{O_2} y r_{CO_2} son flujos de permeación (kg_{gas} s⁻¹) de O₂ y CO₂, respectivamente, a través del plástico de envase, $\bar{P}_{O_2}$ y $\bar{P}_{CO_2}$ son coeficientes

de permeabilidad ($\text{kg m s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$) a O_2 y a CO_2 del plástico, A_p es el área (m^2) de intercambio de gases, δ es el espesor (m) del mismo envase y $p_{\text{O}_2}^e$, $p_{\text{O}_2}^i$, $p_{\text{CO}_2}^e$ y $p_{\text{CO}_2}^i$ son concentraciones de O_2 y CO_2 , expresadas como presiones parciales (Pa) en las atmósferas circundante (superíndice c) y externa (superíndice e).

A medida que el gradiente de concentración de O_2 y CO_2 entre las dos atmósferas es mayor, también será mayor el flujo por permeación a través del plástico y en algún momento los flujos de ambas interacciones se igualan, lo que propicia que las concentraciones en la atmósfera circundante dejan de variar y alcanzan valores constantes en el tiempo, dando lugar a la fase de régimen estacionario (RE) (Figura 3B). A todo este periodo transitorio, desde que se cierra el envase plástico hasta que las concentraciones se hacen constantes, se le reconoce como la etapa régimen transitorio (RT) de instalación de la AM (Figura 3B). Si sobre ella se aplica un balance de materiales se obtienen las Ecuaciones (23) y (24) que describen los cambios de concentración de O_2 y CO_2 (Valle-Guadarrama et al., 2005; Raj y Paul, 2007; Valle-Guadarrama et al., 2008):

$$r_{\text{O}_2} - m_{fr} \cdot g_{\text{O}_2} = \frac{dm_{\text{O}_2}}{dt} \quad (23)$$

$$m_{fr} \cdot g_{\text{CO}_2} - r_{\text{CO}_2} = \frac{dm_{\text{CO}_2}}{dt} \quad (24)$$

donde m_{fr} es la masa (kg) de frutos envasados en la AM, m_{O_2} es la masa (kg) de O_2 dentro del envase y m_{CO_2} es la masa (kg) de CO_2 también en el

interior del envase plástico. Se aceptó que por las condiciones de baja presión en las que se desarrollan los sistemas de AM, la mezcla gaseosa del interior del envase se comporta como un gas ideal. Bajo esta consideración las Ecuaciones (23) y (24) se expresaron en la forma de las Ecuaciones (25) y (26), donde ya se encuentran sustituidas las Ecuaciones (19) a (22):

$$\frac{dp_{O_2}^c}{dt} = \left[\frac{R(T + 273.15)}{V_L M_{O_2}} \right] \left[\frac{\bar{P}_{O_2} A_p (p_{O_2}^e - p_{O_2}^c)}{\delta} - \frac{m_f g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^c}{K_M + p_{O_2}^c \cdot \left(1 + p_{CO_2}^c / K_a\right)} \right] \quad (25)$$

$$\frac{dp_{CO_2}^c}{dt} = \left[\frac{R(T + 273.15)}{V_L M_{CO_2}} \right] \left[\frac{m_f Cr g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^c}{K_M + p_{O_2}^c \cdot \left(1 + p_{CO_2}^c / K_a\right)} - \frac{\bar{P}_{CO_2} A_p (p_{CO_2}^c - p_{CO_2}^e)}{\delta} \right] \quad (26)$$

donde R es la constante del gas ideal ($\text{Pa m}^3 \text{ kg}_{\text{mol}}^{-1} \text{ K}^{-1}$), V_L es el volumen libre (m^3) dentro de la AM y T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) prevaleciente. Por otro lado, cuando se alcanzan las condiciones de régimen estacionario (RE), es decir, cuando las concentraciones de O_2 y CO_2 se hacen constantes dentro del envase plástico, las Ecuaciones (25) y (26) se transforman en las Ecuaciones (27) y (28):

$$\left[\frac{\bar{P}_{O_2} A_p (p_{O_2}^e - p_{O_2}^c)}{\delta} - \frac{m_f g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^c}{K_M + p_{O_2}^c \cdot \left(1 + p_{CO_2}^c / K_a\right)} \right] = 0 \quad (27)$$

$$\left[\frac{m_f Cr g_{O_2}^{\max} p_{O_2}^c}{K_M + p_{O_2}^c \cdot \left(1 + p_{CO_2}^c / K_a\right)} - \frac{\bar{P}_{CO_2} A_p (p_{CO_2}^c - p_{CO_2}^e)}{\delta} \right] = 0 \quad (28)$$

3.3.2. Parametrización de modelos.

Se decidió evaluar el uso de bolsas de polietileno de baja densidad (PBD). Considerando dimensiones de materiales comerciales se previeron dimensiones de 36 cm × 24 cm, para empacar lotes de frutos de masa m_f igual a 0.3 kg y se evaluó que el cierre puede realizarse a 25 cm de la base, lo que produjo área de intercambio de $[(25 \text{ cm} \times 24 \text{ cm})^2 = 0.12 \text{ m}^2]$. Mediante un método de aforo se determinó que el volumen libre V_L dentro de los empaques podría variar entre 0.50 y 2.00 L. Asimismo, se aceptó que en el ambiente externo la concentración de O_2 sería de 20.95 % ($p_{O_2}^e$ igual a 16262 Pa) y la de CO_2 de 0.03 % ($p_{CO_2}^e$ igual a 23 Pa) durante la operación de la AM.

Se estimaron los coeficientes de permeabilidad a O_2 (P_{O_2}) y a CO_2 (P_{CO_2}) del PBD a 20 y 8 °C. Según Cameron *et al.* (1995) la dependencia de la permeabilidad con la temperatura se puede expresar por medio del Q_{10} , el cual se define en los términos de la Ecuación (29), donde T_1 y T_2 (°C) son las temperaturas que corresponden a los valores de permeabilidad P_1 y P_2 , respectivamente:

$$Q_{10} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\left(\frac{10}{T_1 - T_2} \right)} \quad (29)$$

El Cuadro 8 presenta los datos de permeabilidad publicados por Cameron *et al.* (1995) para la condición de 0 °C y los publicados por Raj y Paul (2007) para 15 °C para el material seleccionado:

Cuadro 8. Valores de permeabilidad a O₂ y a CO₂ del polietileno de baja densidad (PBD) a las condiciones de 0 y 15 °C.

Material	T (°C)	Gas	Permeabilidad	Fuente
PBD	0	O ₂	$27 \times 10^{-13} \text{ mol m s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ kPa ⁻¹	Cameron <i>et al.</i> (1995)
PBD	0	CO ₂	$99 \times 10^{-13} \text{ mol m s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ kPa ⁻¹	Cameron <i>et al.</i> (1995)
PBD	15	O ₂	$8.53 \times 10^{-6} \text{ mL mm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kPa ⁻¹ (espesor de 57 µm)	Raj y Paul (2007)
PBD	15	CO ₂	$9.76 \times 10^{-6} \text{ mL mm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kPa ⁻¹ (espesor de 57 µm)	Raj y Paul (2007)

Los datos de Cameron *et al.* (1995) se convirtieron en forma directa a kg m s⁻¹ m⁻² Pa⁻¹. Sin embargo, los datos de Raj y Paul (2007) consistían en realidad de valores de permeancia, definida como el cociente de la permeabilidad entre el espesor de película (Banks *et al.*, 1995). En tal sentido, se multiplicaron los valores correspondientes de permeancia y espesor para obtener permeabilidad, con lo cual se obtuvieron valores en

unidades de $\text{mL m mm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$. Los datos se convirtieron a $\text{m}^3 \text{ m m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ y para expresar en unidades másicas, se consideró la presión atmosférica (P_{atm}) del lugar donde se hizo la determinación (Ludhiana, India; 244 msnm; P_{atm} igual a 98427 Pa), y se aceptó comportamiento de gas ideal para aplicar la relación descrita por la Ecuación (30):

$$\left(\bar{P}_j \text{ en } \frac{\text{kg m}}{\text{s m}^2 \text{ Pa}} \right) = \left(\bar{P}_j \text{ en } \frac{\text{m}^3 \text{ m}}{\text{s m}^2 \text{ Pa}} \right) \left(\frac{P_{atm} M_j}{R(T + 27315)} \right) \quad (30)$$

donde M_j es peso molecular de O_2 o CO_2 (32 y 44 $\text{kg kg}_{\text{mol}}^{-1}$, respectivamente), R es la constante del gas ideal, sustituida como 8314.4 $\text{Pa m}^3 \text{ kg}_{\text{mol}}^{-1} \text{ K}^{-1}$, T es temperatura (15 °C) y el subíndice j refiere el gas permeante (O_2 o CO_2). El Cuadro 9 presenta los valores de permeabilidad en unidades del sistema internacional. Asimismo, presenta los valores de Q_{10} y los valores determinados para las condiciones de 20 y 8 °C, que fueron los empleados en el presente trabajo y calculados mediante la Ecuación (31), obtenida a partir de la Ecuación (29), donde $\bar{P}_3$ representa un valor de permeabilidad a una temperatura distinta a 0 ó 15 °C:

$$\bar{P}_3 = \frac{\bar{P}_1}{\exp \left[\left(\frac{\ln Q_{10}}{10} \right) (T_1 - T_3) \right]} \quad (31)$$

3.3.3. Estudio de la operación de la AM.

Se estudiaron las características del sistema para conseguir concentraciones de O_2 en el rango de 2 a 20 % a 8 y 20 °C, para lo cual se utilizaron las Ecuaciones (27) y (28). Se hizo un análisis de grados de libertad de estas

relaciones y se encontró que se conocía la magnitud de las variables m_{fr} , A_p , P_{O_2} , P_{CO_2} , $g_{O_2}^{max}$, K_M , K_a , $p_{O_2}^e$ y $p_{CO_2}^e$, pero se desconocía el valor del espesor del envase δ y de las presiones parciales puntuales de O_2 y CO_2 dentro del envase ($p_{O_2}^e$ y $p_{CO_2}^e$).

Dado que se contaba con dos ecuaciones (27 y 28) para obtener el valor de tres variables, una de estas últimas debía ser definida o fijada previamente, al igual que el conjunto citado de variables conocidas. Como uno de los problemas frecuentes de la operación de las AM es el desarrollo de un metabolismo fermentativo, derivado de una reducción excesiva de O_2 , se decidió considerar a la presión parcial de O_2 como variable independiente, lo que causó que el espesor (δ) del empaque y la presión parcial de CO_2 ($p_{CO_2}^e$) dentro del mismo fueran consideradas variables dependientes y su valor se determinó mediante las Ecuaciones (27) y (28), que se resolvieron simultáneamente.

Adicionalmente, se simuló la fase de régimen transitorio de la AM considerando que ésta se desarrolla en forma pasiva. Se resolvieron simultáneamente las Ecuaciones (25) y (26), para cada temperatura (8 y 20 °C), mediante el método de Runge-Kutta de Cuarto Orden (Burden y Faires, 1986) y se estudio el tiempo de instalación para las condiciones correspondientes a una concentración de O_2 de 5 % en el interior del envase.

Cuadro 9. Estimación de coeficientes de permeabilidad a O₂ y a CO₂ de polietileno de baja densidad (PBD) mediante valores de Q_{10} .

Material	T (°C)	Gas	Permeabilidad/10 ¹⁷ (kg m s ⁻¹ m ⁻² Pa ⁻¹)	Q_{10} (adimensional)
Datos de literatura (Cameron <i>et al.</i> , 1995; Raj y Paul, 2007)				
PBD	0	O ₂	8.640	--,--
PBD	0	CO ₂	43.560	--,--
PBD	15	O ₂	17.756	--,--
PBD	15	CO ₂	27.934	--,--
Valores calculados de Q_{10}				
PBD	--,--	O ₂	--,--	1.6164
PBD	--,--	CO ₂	--,--	0.7436
Valores estimados con base en Q_{10}				
PBD	8	O ₂	12.687	--,--
PBD	20	O ₂	22.574	--,--
PBD	8	CO ₂	34.371	--,--
PBD	20	CO ₂	24.088	--,--

3.4. Fase de investigación tres

3.4.1. Organización experimental general.

Se evaluó el comportamiento de frutos de tuna blanca empacados en dos películas plásticas a dos temperaturas (8 y 20 °C). Los empaques consistieron de bolsas de polietileno de baja densidad (PBD) y bolsas Ziploc®, ambas adquiridas en un comercio local. Adicionalmente se observó

el comportamiento de frutos sin empacar a las dos temperaturas, que sirvieron como testigos. El almacenamiento se condujo por 50 días. De esta forma, el experimento se llevó a cabo como un diseño completamente al azar, con arreglo de tratamientos en factorial 2x3. El factor A estuvo formado por la temperatura, que tuvo dos niveles (8 y 20 °C) y el factor B por el empaque, con tres niveles (frutos sin empacar en bolsa, frutos en bolsa de polietileno de baja densidad normal y frutos empacados en bolsas Ziploc®). La unidad experimental (UE) estuvo formada por un lote de 3 frutos. Los seis tratamientos que se formaron se denominaron en la siguiente forma TS8 (tuna sin empaque a 8 °C), TS20 (tuna sin empaque a 20 °C), TP8 (tuna en PBD a 8 °C) TP20 (tuna en PBD a 20 °C), TZ8 (tuna en bolsa Ziploc® a 8 °C) y TZ20 (tuna en bolsa Ziploc® a 20 °C).

3.4.2. Material vegetal y caracterización inicial:

Se utilizaron frutos de tuna blanca (*Opuntia albicarpa*) cosechados con navaja en San Felipe, Teotitlán, Nopaltepec, México. Los frutos fueron desespinaados en el equipo de un productor de la localidad, con el procedimiento normal usado para material destinado a exportación. La cantidad de material a cosechar fue de 1000 frutos. El día de la cosecha se tomó una muestra de 10 frutos para realizar una caracterización inicial en términos de peso total, diámetro ecuatorial, largo, velocidad de respiración, color de cáscara, firmeza de cáscara y pulpa, peso de la cáscara, peso de la pulpa y características químicas de la pulpa (°Brix y acidez).

3.4.3. Manejo de tratamientos.

El día de la cosecha, los frutos recibieron un tratamiento de inmersión en solución de hipoclorito de sodio a 500 ppm. Al término se secaron con toallitas de papel y se formarán 330 lotes de tres frutos cada uno. A todos los lotes se les registró el peso. De estos lotes formados 110 se empacaron en bolsas de PBD, 110 en bolsas Ziploc® y 110 se dejarán sin empacar. La mitad de los todos los lotes de cada tipo de empaque (55 de cada uno) se colocó en un cuarto aislado a 8 °C y la otra mitad en un segundo cuarto aislado a 20 °C. El día que se realizó este proceso constituyó el día cero del experimento. En el día uno (siguiente día posterior a la instalación), de cada uno de los tratamientos se retiraron tres unidades experimentales (UE) de cada tratamiento (como se tenían seis tratamientos se retiraron 18 UE). Cada UE se sometió a evaluación con la siguiente secuencia: (1) se registró la concentración de O₂ y CO₂ en el interior de los empaques; (2) a todos las UE retiradas se les midió peso; (3) a todos los frutos retirados se les midió color de cáscara; (4) se calculó la respiración con base en los resultados de la fase uno; (5) a todos los frutos se les midió firmeza de cáscara; (6) a todos los frutos se les quitó la cáscara y se les midió firmeza de pulpa; (7) se registró el peso de cáscara y de la pulpa por separado; (8) de la pulpa de cada fruto se tomaron 10 gramos aproximadamente mediante un sacabocados, y las muestras de los tres frutos de cada unidad experimental se colocaron juntas en un vial de 37 mL; al final se tenían 18 viales (3 por cada uno de los tratamientos), los cuales se destinaron a evaluación de acetaldehído y etanol; (9) del material restante de cada fruto se tomaron 100 g y las muestras de los 2 frutos de cada unidad experimental se maceraron

juntas y se extrajo el jugo resultante (mediante una coladera), que se envasó en recipiente hermético y se destinó a evaluación de °Brix, acidez y contenidos de azúcares (reductores y totales). Del paso (9) resultaron 18 muestras en recipiente hermético (3 de cada uno de los tratamientos). Las muestras de los pasos (8) y (9) se colocaron inmediatamente a -20 °C y al día siguiente se trasladaron hasta el momento de su evaluación. Todo este procedimiento se repitió a los días 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46 y 50. Así se tuvieron 17 estaciones de muestreo en el tiempo (incluyendo el día 1) a lo largo de 7 semanas. Al final se programaron 306 viales para caracterización de acetaldehído y etanol y 306 muestras en recipiente hermético para caracterización de °Brix, acidez y azúcares.

3.4.5. Manejo de los envases.

En todas las bolsas se colocó un tubo de vidrio de 3 mL, abierto, junto con su tapón. El cierre de las bolsas se realizó por trenzado y se aseguró la hermeticidad, cuidando que el volumen libre dentro del envase fuera igual en todas las unidades. Cuando las unidades se retiraron del almacenamiento se cerró el tubo colocado en el interior para retener una muestra del contenido gaseoso y evaluar posteriormente la concentración del mismo, lo que se consideró la condición de operación de la unidad. Después de esto, las bolsas se cortaron en el límite de la región del trenzado para posteriormente evaluar el área de intercambio de gases. Finalmente se sometieron a medición de su espesor, lo cual se hizo con un tornillo micrométrico (Central Scientific Co. Chicago, EE. UU.). Para esto, se tomaron 10 muestras de 3 cm × 3 cm, las cuales fueron colocadas, en forma alternada entre

cubreobjetos de vidrio. Se tomó el espesor del conjunto y después se retiraron las muestras plásticas y se repitió la medición, pero sólo a los cubreobjetos. El espesor se determinó restando el espesor de los cubreobjetos del espesor del conjunto muestras-cubreobjetos y dividiendo la diferencia por 10, para expresar el resultado en micrones (μm).

3.4.6 Unidad experimental

Las unidades experimentales consistieron de 3 frutos por cada tratamiento, se manejaron tres repeticiones (Figura 4). El almacenamiento se condujo por 50 días. Los seis tratamientos que se formaron se denominaron de la siguiente forma TS8 (tuna sin empaque a 8 °C), TS20 (tuna sin empaque a 20 °C), TP8 (tuna en PBD a 8 °C) TP20 (tuna en PBD a 20 °C), TZ8 (tuna en bolsa Ziploc® a 8 °C) y TZ20 (tuna en bolsa Ziploc® a 20 °C).



Figura 4. Unidades experimentales

3.5 Variables respuestas

Las variables respuestas que se consideraron como parámetros de calidad fueron: color (brillantez, cromaticidad y ángulo Hue), pérdida de peso,

firmeza (pulpa, cáscara), acidez titulable, °Bx, azúcares (totales y reductores)

3.5.1 Intensidad de color

Esta variable se evaluó con un colorímetro Hunter Lab modelo Miniscan XE Plus No. 45/O-L utilizando la escala del Cielab de Hunter (L^* , a^* , b^*), donde L^* define la luminosidad o brillantez de la muestra cuyos valores varían desde 0 que representa colores totalmente oscuros (negro) hasta 100 que representa colores de máxima brillantes (blanco); a^* mide la diferencia entre la luz reflectada por la muestra en la zona de rojo a verde, donde los valores negativos de a^* indican tonalidades verdes mientras que los positivos indican tonalidades rojas. El parámetro b^* mide la diferencia entre la luz reflectada en la zona de amarillo a azul, donde los valores negativos definen tonalidades azules, en tanto que valores positivos indican tonalidades amarillas (Minolta 1994). Con esta información se calcularon la cromaticidad $[(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$ y el ángulo de tono o matiz ($\tan^{-1} b^*/a^*$) (Mc Guire, 1992).

3.5.2. Firmeza

Esta variable se determinó con un equipo analizador de textura modelo TAXTi (Stable Micro System, UK), introduciendo en la región ecuatorial de la tuna blanca con cáscara un sonda cónica y en la tuna sin cáscara se introdujo en la misma zona pero en la parte posterior una sonda tipo aguja de acero inoxidable clave P/2N.

3.5.3 Pérdida fisiológica de peso

Se utilizó una balanza digital portátil (Ohaus, USA). Se calculó el porcentaje acumulado de peso (PP , %) respecto al peso al inicio del almacenamiento, mediante la Ecuación (32), donde P_i es peso inicial y P_f peso final evaluado al momento del retiro de la unidad experimental:

$$PP (\%) = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100 \quad (31)$$

3.5.4 Sólidos solubles totales

Se determinó con ayuda de refractómetro digital portátil PAL-1 (ATAGO, USA) Utilizando una escala de 0-53°, expresado de °Brix a 20 °C y previamente calibrado con agua destilada. Para ello se ocupó jugo de la fruta obtenido al exprimir la pulpa del tratamiento evaluado.

3.5.5 Acidez titulable

Se determinó empleando el método escrito en el manual AOAC (1980) que se basa en la titulación de 10 mL de muestra de jugo filtrado con NaOH 0.1 N y representa el contenido mayor de ácidos libres del jugo, contribuyendo en mayor medida el ácido cítrico. Se expresó el resultado en porcentaje de ácido cítrico mediante la Ecuación (32):

$$Acidez (\%) = \left(\frac{(mL NaOH)(N)(0.064)}{\text{peso de la muestra}} \right) \times 100 \quad (32)$$

donde (*mL de NaOH*) son los mililitros gastados de NaOH en la titulación; *N* es la normalidad del NaOH; la constante 0.064 corresponde a los miliequivalentes del ácido cítrico (mg meq^{-1}) y *Acidez (%)* corresponde al contenido de ácido cítrico.

3.5.6 Azúcares totales

Fueron determinados utilizando 5 g de peso fresco de pulpa de tuna. Se realizó una extracción con alcohol etílico al 70 %, poniéndose 15 minutos a ebullición para poder extraer los azúcares. Posteriormente se determinó el contenido de azúcares totales por el método con antrona descrito Witham *et al.*, 1971). La estimación de los azúcares totales se realizó a partir de una curva patrón de solución de glucosa ($300 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) con agua destilada

3.5.7 Azúcares reductores

La determinación de los azúcares se realizó midiendo los monosacáridos a través de su oxidación (en una solución alcalina) por el Cu^{+2} , Ag^{+} o ferricianuro, produciéndose una mezcla de azúcares reductores, siendo los principales de ellos la glucosa y fructosa (Lehninger, 1975). Para la determinación de estos azúcares se utilizó la metodología de Nelson Somogy. Esta prueba se basa en la reacción de un azúcar reductor con un ión cúprico que se transforma en la forma cuprosa y produciéndose un azúcar ácido. El ión cuproso es de color rojo pero no puede valorarse pues es insoluble, motivo por el cual se trata con el reactivo de arsenomolibdato que se reduce a un ión verdoso y que se mide colorimétricamente.

3.5.8 Medición de concentraciones

La cuantificación de etanol, acetaldehído, oxígeno y bióxido de carbono se realizó por cromatografía de gases. Para el caso del etanol y acetaldehído se usó la técnica de espacio de cabeza propuesta por Davis y Chase (1969). Se tomaron muestras de pulpa por tratamiento y día de análisis, las cuales se colocaron en viales sellados y se almacenaron a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para su cuantificación se hizo una incubación en baño maría a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 10 minutos. Una vez salidos de la incubación se agitaron por 5 segundos en vortex para tubos. Se tomó 1 mL de espacio libre del vial y se inyectó en un cromatógrafo de gases Varian 3400CX (USA). Para determinar los tiempos de retención del etanol y acetaldehído se inyectaron muestras que contenían a estos compuestos tratados con el mismo procedimiento descrito para la muestra. Se preparó una solución madre con una concentración de $174\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de etanol y $31.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de acetaldehído y se inyectaron varias cantidades (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mL) para obtener la curva patrón de cada compuesto y poder realizar el cálculo del contenido de cada uno en la pulpa.

Las condiciones de operación del cromatógrafo para la determinación de ambos volátiles fueron $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura del inyector, $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la columna y $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el detector de ionización de flama FID. Para el caso del O_2 se utilizó un estándar primario con 2.01 % de concentración (Praxair de México, S.A. de C.V.). Para bióxido de carbono se construyó una curva tipo diluyendo CO_2 de alta pureza (99.8 %; Praxair de México S.A. de C.V.), en volúmenes medidos de aire, para formar mezclas con 0.03, 2.93, 5.66, 8.24, 10.69, 11.86, 13.01, 15.21, 17.30, 19.29, 20.25, 21.19 y 23 %. En forma

semejante, para los casos de acetaldehído y etanol se prepararon curvas tipo a partir de mezclas preparadas con concentraciones de estos compuestos y agua destilada de 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 y 1.0 mg·100L⁻¹.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Fase de investigación uno

La Figura 5 muestra las cinéticas de cambio de concentración de O_2 y CO_2 dentro de los recipientes de prueba manejados a 20 °C y la Figura 6 los manejados a 8 °C:

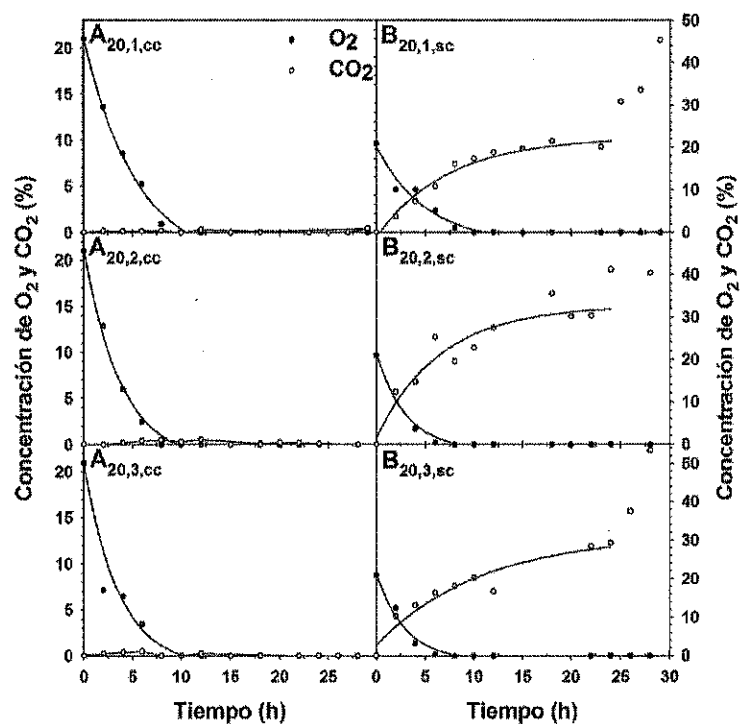


Figura 5. Cinéticas de cambio pasivo de concentración de O_2 y CO_2 a 20 °C en recipientes herméticos de 3.21 L de capacidad que contenían lotes de tuna de $1.64 (\pm 0.07)$ kg. Los recuadros $A_{i,j,k}$ refieren unidades manejadas con cal (CO_2 ausente) y la $B_{i,j,k}$ unidades sin cal (CO_2 ausente), donde los subíndices i , j y k indican respectivamente temperatura, repetición y presencia (cc) o ausencia (sc) de cal colocada para depurar CO_2 .

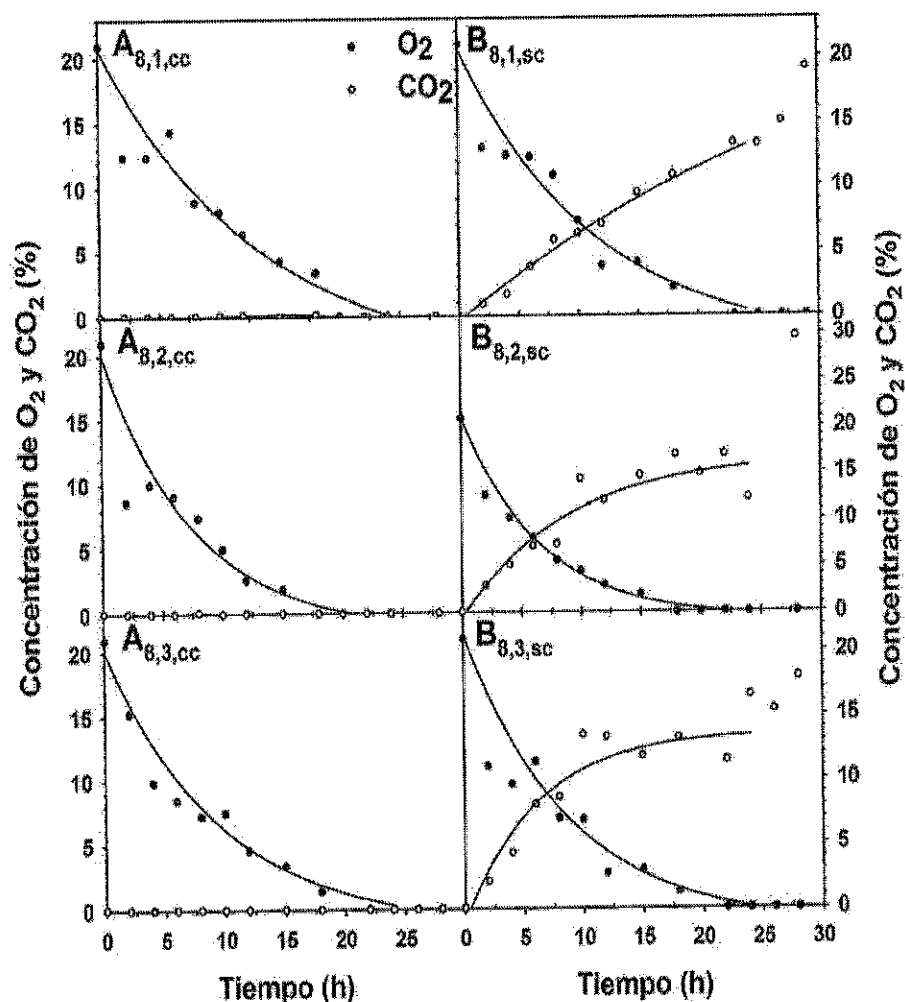


Figura 6 . Cinéticas de cambio pasivo de concentración de O_2 y CO_2 a 8 °C en recipientes herméticos de 3.21 L de capacidad que contenían lotes de tuna de $1.64 (\pm 0.07)$ kg. Los recuadros $A_{i,j,k}$ refieren unidades manejadas con cal (CO_2 ausente) y la $B_{i,j,k}$ unidades sin cal (CO_2 ausente), donde los subíndices i, j y k indican respectivamente temperatura, repetición y presencia (cc) o ausencia (sc) de cal colocada para depurar CO_2 .

En todos los casos se registró un descenso en la concentración de O_2 hasta un grado de agotamiento completo al cabo de cierto tiempo. Respecto del

CO₂, éste sólo se incrementó en los recipientes que no contuvieron cal y, en aquellos donde este compuesto estuvo presente, la concentración registrada de dicho gas fue nula. En tal sentido se cumplió el propósito de disponer de tratamientos con y sin CO₂ para observar su efecto sobre la actividad respiratoria de los frutos.

Cuadro 10. Constantes de regresión asociadas a las Ecuaciones (4) y (5) para la representación de la variación de O₂ y CO₂ a 20 y 8 °C en el interior de recipientes de 3.21 L con lotes de 1.64 (±0.07) kg de frutos de tuna blanca.

Corrida ^{II}	$y_{O_2}^o$ (%)	a_o (%)	b_o (h ⁻¹)	R_o^2 ^{III}	$y_{CO_2}^o$ (%)	a_c (%)	b_c (h ⁻¹)	R_c^2 ^{III}
A _{20,1,cc}	21.0791	-24.58	0.1843	0.9926	--,--	--,--	--,--	--,--
A _{20,2,cc}	21.3460	-23.10	0.2667	0.9918	--,--	--,--	--,--	--,--
A _{20,3,cc}	20.8789	-22.14	0.2796	0.9939	--,--	--,--	--,--	--,--
B _{20,1,sc}	20.1977	-22.69	0.1997	0.9575	-1.0587	23.3199	0.1383	0.9876
B _{20,2,sc}	21.4842	-22.72	0.3368	0.9814	1.5403	31.0581	0.1544	0.9101
B _{20,3,sc}	21.5526	-22.79	0.3417	0.9759	2.7815	28.4323	0.0937	0.9658
A _{8,1,cc}	20.7181	-24.90	0.0735	0.9706	--,--	--,--	--,--	--,--
A _{8,2,cc}	20.0505	-21.50	0.1304	0.9586	--,--	--,--	--,--	--,--
A _{8,3,cc}	20.0507	-21.55	0.1030	0.9837	--,--	--,--	--,--	--,--
B _{8,1,sc}	20.5802	-23.07	0.0867	0.9778	-0.4224	28.4501	0.0268	0.9894
B _{8,2,sc}	21.0139	-21.77	0.1517	0.9889	-0.6299	17.4511	0.1127	0.9412
B _{8,3,sc}	21.2296	-22.68	0.1136	0.9819	-1.0669	14.7753	0.1610	0.9003

^{II}A_{i,j,k} y B_{i,j,k} refieren las corridas experimentales, donde los subíndices i, j y k indican respectivamente temperatura, repetición y presencia (cc) o ausencia (sc) de cal colocada para depurar CO₂. ^{III}R_o² y R_c²: Coeficiente de determinación.

Las cinéticas de cambio de concentración de O_2 y CO_2 se ajustaron bien a las Ecuaciones (4) y (5) y el Cuadro (10) muestra las constantes de regresión obtenidas. Por otro lado, poco tiempo después de que el O_2 se agotó en los recipientes la concentración de CO_2 comenzó a elevarse en forma evidente, lo cual sugirió que se inició una actividad fermentativa. Al respecto, Boersig *et al.* (1988) señalaron que el incremento de la concentración de CO_2 puede interpretarse como un síntoma de la transición entre los metabolismos oxidativo y fermentativo, y en tal circunstancia la provisión de energía se realiza fundamentalmente por medio de la glicólisis.

Con apoyo de estas cinéticas se determinó la relación entre el consumo de O_2 y la producción de CO_2 con las concentraciones de estos gases. La Figura 7 muestra las rectas de Lineweaver-Burk de cada una de las corridas a 20 °C y a 8 °C y el Cuadro 11 los valores de cociente respiratorio en las corridas donde el CO_2 no fue depurado con cal. Respecto de este último, el análisis estadístico señaló diferencia significativa por efecto de temperatura, siendo mayor en la condición de 20 °C en relación con la de 8 °C.

Se realizó un análisis de varianza de las pendientes de las rectas de Lineweaver-Burk y los resultados se muestran en el Cuadro 12. De acuerdo con la teoría de la cinética enzimática (Lehninger, 1998), si entre los comportamientos respiratorios de los frutos con CO_2 y sin CO_2 existe diferencia, entonces el efecto de este gas sobre dicha actividad respiratoria es de tipo competitivo. En contraste, si no existe diferencia entonces el efecto es de tipo acompetitivo.

El Cuadro 12 muestra que al interior de cada condición térmica no hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre las pendientes de las rectas de Lineweaver-Burk correspondientes a comportamientos con y sin CO_2 presente, lo cual es indicativo que el efecto de dicho gas es de tipo incompetitivo. Esto significa que si el CO_2 afecta el comportamiento respiratorio de los frutos, lo hace de manera indirecta, es decir, que no actúa directamente sobre las enzimas oxidativas de la cadena terminal, que son las que directamente participan en el consumo de O_2 .

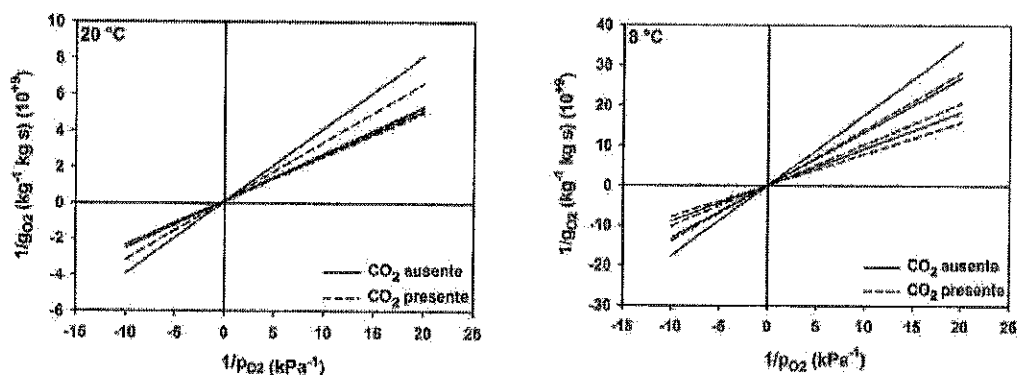


Figura 7. Rectas de Lineweaver-Burk para la relación entre el consumo de O_2 (g_{O_2}) y la concentración del mismo gas expresada como presión parcial (p_{O_2}).

Por otro lado, sí se encontró diferencia entre temperaturas y esto indica que la condición térmica constituye un elemento de afectación directo. Este hecho se consideró normal, dado que está bien documentado que con la temperatura la actividad de muchas enzimas involucradas en el metabolismo disminuye (Kader y Saltveit, 2003). A partir de la pendiente y la ordenada al

origen de cada recta de Lineweaver-Burk (Ecuación 10) se determinaron los parámetros aparentes de Michaelis-Menten ($g_{O_2,ap}^{max}$; $K_{M,ap}$).

Cuadro 11. Comparación de medias del cociente respiratorio (Cr) entre temperaturas para corridas experimentales donde no se depuró el CO_2 .

Temperatura (°C)	Cr (adimensional)
20	1.3488 a ^{††††}
8	0.8846 b
DSH ^{††} (°C)	0.4442
C. V. ^{†††} (%)	17.5478

^{††} DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05); ^{†††} C. V.: coeficiente de variación; ^{††††} letras iguales entre niveles de temperatura indican diferencia no significativa (Tukey, 0.05).

Cuadro 12. Comparación de pendientes ($kg_{fr} \text{ s kPa } kg_{O_2}^{-1}$) de rectas de Lineweaver-Burk para la relación entre el consumo de O_2 y la concentración de O_2 a dos temperaturas (8 y 20 °C) bajo dos condiciones de concentración de CO_2 (ausente y presente).

Factor temperatura	Pendiente de Lineweaver-Burk ($kg_{fr} \text{ s kPa } kg_{O_2}^{-1}$)		DSH ($kg_{fr} \text{ s kPa } kg_{O_2}^{-1}$)
	CO_2 ausente	CO_2 presente	
8 °C	1341306069 A (a) ^{††}	1072298634 A (a)	$8.52 \times 10^{+8}$
20 °C	304378136 B (a)	276578703 B (a)	$1.53 \times 10^{+8}$
DSH [†] ($kg_{fr} \text{ s kPa } kg_{O_2}^{-1}$)	$7.04 \times 10^{+8}$	$5.03 \times 10^{+8}$	
C. V. ^{††} (%)	36.06		
Temperatura* CO_2	Ns		

[†]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05); ^{††}C. V.: Coeficiente de variación; ^{†††}Letras mayúsculas iguales indican diferencia no significativa entre valores de una misma columna y letras minúsculas iguales entre valores de una misma hilera.

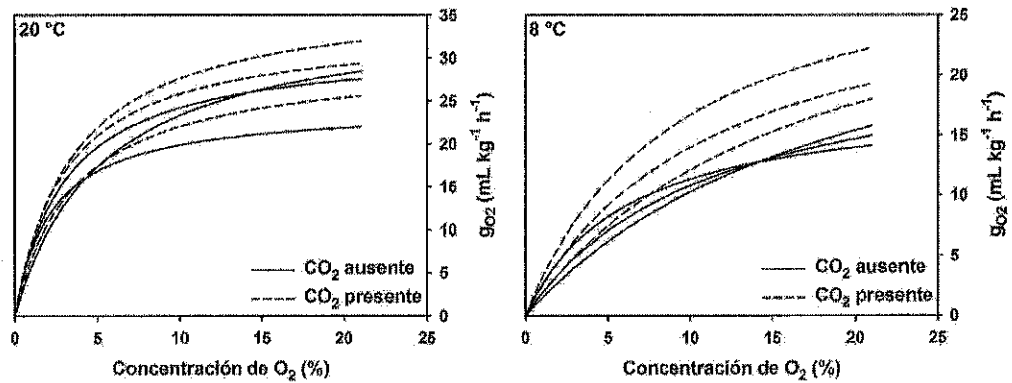


Figura 8. Cinéticas de Michaelis-Menten para la funcionalidad entre el consumo de O_2 (g_{O_2}) y la concentración (%) del mismo gas a 20 y a 8 °C

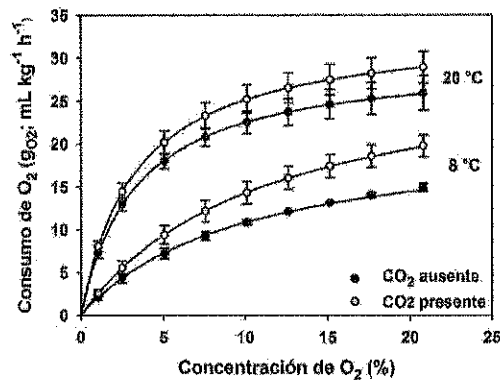


Figura 9 Efecto de la temperatura, de la presencia de O_2 y de la presencia de CO_2 sobre la velocidad de consumo de O_2 de frutos de tuna blanca.

La Figura 8 muestra las cinéticas individuales de Michaelis-Menten construidas a partir de los parámetros aparentes particulares con base en la Ecuación (9), donde se considera tanto el factor temperatura (20 y 8 °C) como el factor CO_2 . En esta figura la concentración de O_2 se expresó en

por ciento (%) y el consumo de O_2 en $mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$ para facilitar la comprensión. Por otro lado, la Figura 9 compara esquemáticamente el efecto de cada uno de los factores y el Cuadro 13 resume el análisis de varianza realizado sobre los parámetros aparentes de Michaelis-Menten.

De acuerdo con el análisis de varianza, no hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en el consumo máximo aparente de O_2 ($g_{O_2,ap}^{max}$) por efecto de temperatura y tampoco por efecto de la presencia de CO_2 . Aunque la Figura 9 muestra diferencias notables en la velocidad de consumo de O_2 a los valores mostrados de concentración de dicho gas, el análisis estadístico sugiere que con valores mayores a los considerados en la figura de referencia los valores de $g_{O_2,ap}^{max}$ tienden a igualarse. Por otro lado, en los valores de la constante de Michaelis-Menten aparente ($K_{M,ap}$) no se encontró diferencia por la presencia de CO_2 , pero sí por efecto de temperatura.

La constante de Michaelis-Menten corresponde a la concentración de O_2 a la cual la velocidad de consumo del mismo gas se reduce a la mitad (Lehninger, 1998). En tal sentido, los resultados indican que a la condición de 8 °C la velocidad de consumo de O_2 se reduce más rápidamente que a 20 °C a medida que baja la disponibilidad de O_2 , de tal forma que la concentración requerida de O_2 para que la velocidad mencionada se reduzca a la mitad es mayor a 8 °C que a 20 °C.

Cuadro 13. Comparación de parámetros de Michaelis-Menten aparentes para la relación entre el consumo de O₂ y la concentración de O₂ a dos temperaturas (8 y 20 °C) bajo dos condiciones de concentración de CO₂ (ausente y presente).

Factor temperatura	Factor CO ₂		DSH
	Ausente	Presente	
Variable: $g_{O_2,ap}^{max}$ (mL kg ⁻¹ h ⁻¹)			
8 °C	23.966 A (a)	31.161 A (a)	10.402
20 °C	30.437 A (a)	33.437 A (a)	10.872
DSH [†] (mL kg ⁻¹ h ⁻¹)	13.603	6.431	
C.V. ^{††} (%)	15.75		
Temperatura*CO ₂	Ns		
Variable: $K_{M,ap}$ (%)			
8	12.376 A (a)	12.201 A (a)	12.704
20	3.475 B (a)	3.358 B (a)	2.544
DSH [†] (%)	8.501	6.053	
C. V. ^{††} (%)	51.46		
Temperatura*CO ₂	Ns		

[†]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05); ^{††}C. V.: Coeficiente de variación; ^{††} Letras mayúsculas iguales indican diferencia no significativa entre valores de una misma columna y letras minúsculas iguales entre valores de una misma hilera; $K_{M,ap}$: Constante de Michaelis-Menten aparente; $g_{O_2,ap}^{max}$: velocidad máxima de consumo de O₂ aparente.

El análisis hasta aquí realizado ha mostrado que el CO₂ puede ejercer un efecto indirecto sobre la actividad respiratoria, de tal manera que ésta se puede representar por un modelo acompetitivo de Michaelis-Menten (Hertog

et al., 1998). Sin embargo, el análisis de los parámetros aparentes sugirió que dicho efecto es en realidad nulo, pues no se encontraron diferencias significativas por efecto de la presencia de este gas en el ambiente de los frutos. Con objeto de fortalecer las conclusiones al respecto, se analizó el valor de la constante acompetitiva (K_a), la cual, con valores grandes indica un efecto pequeño y, si por el contrario adopta valores pequeños, indica un efecto grande (Ecuación 11).

La metodología seguida para la obtención de la constante acompetitiva, basada en las Ecuaciones (13) y (14), mostró que a medida que se eleva la concentración de CO_2 el valor de K_a tiende a incrementarse en forma semejante en ambas temperaturas ($P \leq 0.05$) y por cada incremento de 1 % en la concentración de CO_2 el valor de dicha constante acompetitiva se eleva 9.84 % en forma lineal (Cuadro 14). La Figura 5 indicó que a 20 °C la concentración de CO_2 puede elevarse hasta 30 % en el ambiente de los frutos y a 8 °C esta elevación puede alcanzar valores aproximados de 15 %, con lo cual la constante K_a puede cambiar de 0 a 295 % a 20 °C y de 0 a 148 % a 8 °C, es decir, que el efecto del CO_2 puede ser importante en concentraciones pequeñas, pero a medida que aumenta su concentración dicho efecto tiende a desaparecer. Por otro lado, se registró un signo negativo asociado al valor de K_a , lo cual indica que dicho efecto es de tipo estimuladorio y esto se hace evidente con concentraciones pequeñas del gas. De acuerdo con Kader y Saltveit (2003) la presencia de concentraciones moderadas de CO_2 en el ambiente de un producto

hortofrutícola reduce la velocidad de respiración, inhibe la producción y la acción del etileno, retarda cambios composicionales, alivia en algún grado desórdenes fisiológicos y retarda el decaimiento. Sin embargo, los datos del presente trabajo muestran que con baja concentración, el CO₂ puede inducir un efecto estimulador en la actividad respiratoria y que a medida que aumenta la concentración del mismo dicha afectación desaparece. Dado que la literatura no aporta información para explicar este comportamiento se requerirá mayor trabajo experimental posterior para hallar una explicación.

Lo que resulta claro es que primero, los análisis estadísticos señalaron que el CO₂ no causa un efecto significativo sobre la actividad respiratoria de los frutos de tuna blanca, lo cual se confirmó con los valores de K_a que crecen rápidamente con el incremento de la concentración del gas y, segundo, las Figura 9 muestra que con CO₂ presente la velocidad de consumo de O₂ es mayor que con CO₂ ausente, aunque el análisis estadístico realizado apunta que la diferencia no es significativa.

El análisis realizado para determinar el valor de la constante acompetitiva K_a permitió obtener el valor absoluto (ya no aparente) del consumo máximo de O₂ ($g_{O_2}^{max}$), el cual fue en promedio de 23.97 mL kg⁻¹ h⁻¹ para 8 °C y de 30.44 mL kg⁻¹ h⁻¹ para 20 °C, sin que la diferencia entre ambos valores fuera significativa (Cuadro 14), lo cual fue congruente con el análisis mostrado por el Cuadro 13 hecho para parámetros aparentes.

Cuadro 14. Efecto de la temperatura sobre la actividad respiratoria de frutos de tuna blanca, expresada por medio de parámetros de cinética enzimática de Michaelis-Menten.

Temperatura (°C)	$g_{O_2}^{\max}$ (mL kg ⁻¹ h ⁻¹)	K_M (%)	$K_a / X_{CO_2}^r$
8	23.966 A [¶]	10.756 A	-9.959 A
20	30.437 A	3.145 B	-9.719 A
DSH [†]	13.603	7.256	0.299
C. V. ^{††} (%)	22.05861	61.11676	71.56604

[†]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05); ^{††}C. V.: coeficiente de variación (%); [¶]letras mayúsculas iguales indican diferencia no significativa entre valores de una misma columna. K_M : constante de Michaelis-Menten (%); $g_{O_2}^{\max}$: velocidad máxima de consumo de O₂; K_a : constante de inhibición acompetitiva (%); $X_{CO_2}^r$: concentración de CO₂ (%) en el recipiente de prueba.

Asimismo, con base en el comportamiento acompetitivo encontrado para el metabolismo respiratorio de los frutos de tuna, y con el conocimiento del consumo máximo de este gas, el uso de la Ecuación (15) permitió obtener la constante de Michaelis-Menten absoluta (K_M), cuyos valores están registrados en el Cuadro 14, siendo de 10.76 % para la condición de 8 °C y de 3.15 para la condición de 20 °C, con diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre ambos valores.

En resumen, la fase uno del presente trabajo de investigación indicó que la actividad respiratoria de los frutos de tuna blanca puede representarse mediante un modelo acompetitivo. La velocidad de consumo de O₂ es más

sensible a la variación de la concentración de O₂ a la condición de 8 °C que a la de 20 °C, de tal forma que para abatir a la mitad dicha velocidad el O₂ debe disminuir a 10 76 % a 8 °C, pero hasta 3.15 % a 20 °C. Las Ecuaciones (33) y (34) representan los modelos de Michaelis-Menten para las condiciones de 20 y 8 °C, respectivamente.

$$g_{O_2, 20^\circ C} = \frac{30.437 X_{O_2}^r}{3.145 - 0.8971 X_{O_2}^r} \quad (33)$$

$$g_{O_2, 8^\circ C} = \frac{23.966 X_{O_2}^r}{10.756 - 0.8996 X_{O_2}^r} \quad (34)$$

donde $X_{O_2}^r$ es concentración de O₂ (%) y los valores de $g_{O_2, 20^\circ C}$ y $g_{O_2, 8^\circ C}$ se expresan en mL kg⁻¹ h⁻¹. Por otro lado, si se considera el valor del cociente respiratorio (Cr ; Cuadro 11) y la Ecuación (8), las velocidades de producción de CO₂ a 20 y a 8 °C, se representan por las Ecuaciones (35) y (36):

$$g_{CO_2, 20^\circ C} = \frac{Cr (30.437 X_{O_2}^r)}{3.145 - 0.8971 X_{O_2}^r} = \frac{41.0534 X_{O_2}^r}{3.145 - 0.8971 X_{O_2}^r} \quad (35)$$

$$g_{CO_2, 8^\circ C} = \frac{Cr (23.966 X_{O_2}^r)}{10.756 - 0.8996 X_{O_2}^r} = \frac{21.2003 X_{O_2}^r}{10.756 - 0.8996 X_{O_2}^r} \quad (36)$$

La Figura 10 muestra la comparación entre datos simulados y experimentales. Los primeros se obtuvieron con los modelos de Michaelis-Menten y los segundos se grafican a partir de las ecuaciones de regresión cuyos parámetros están registrados en el Cuadro 10. La realización de un análisis estadístico reveló que no había diferencia significativa entre ambos

conjuntos, lo cual permitió aceptar el modelado hecho como válido. Con base en este hecho se procedió a simular el comportamiento de los frutos de tuna blanca en un sistema de atmósfera modificada.

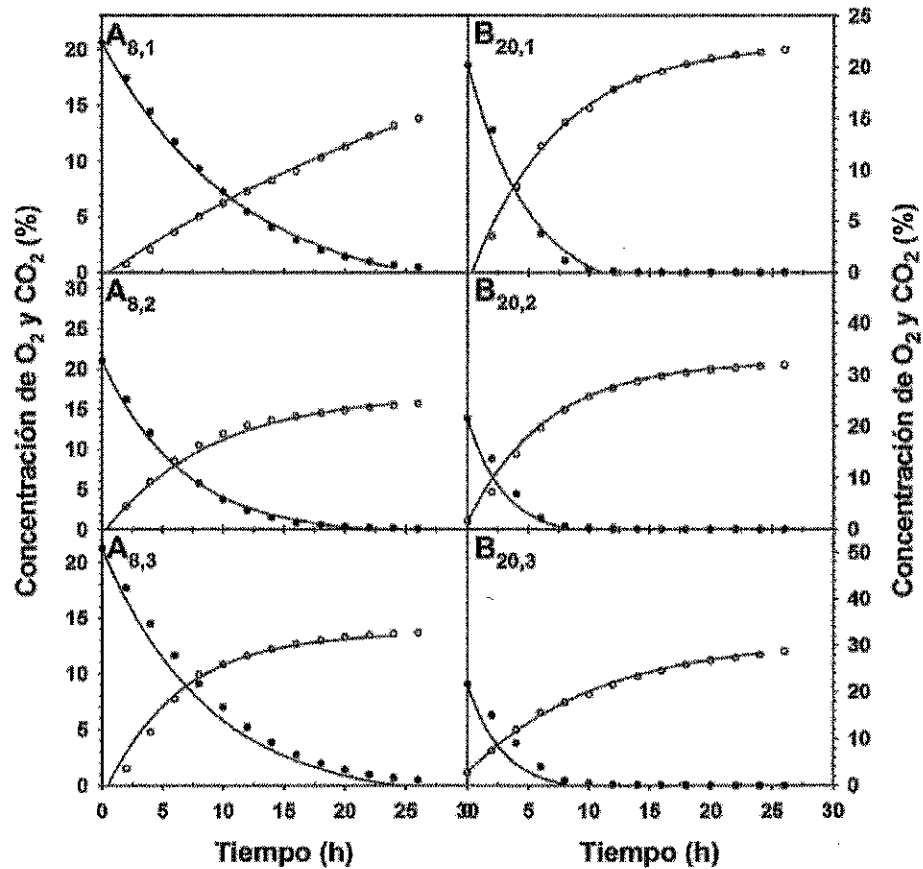


Figura 10. Comparación de datos experimentales (líneas continuas construidas mediante los modelos de regresión) y los datos simulados (datos discretos obtenidos con modelos de Michaelis-Menten). Las letras A , la representan condición de 8 °C y las B , la condición de 20 °C. El subíndice en las leyendas señala la repetición.

4.2. Fase de Investigación dos

La aplicación de las Ecuaciones (27) y (28) para determinar las características de una AM para un manejo adecuado de frutos de tuna

blanca en las condiciones definidas en la sección 3.3.1 produjo los resultados mostrados en la Figura 11, donde se relaciona la concentración a instalar de O_2 con el espesor requerido de envase y la concentración que se instala de CO_2 .

Se encontró que las concentraciones de O_2 y CO_2 guardan una relación lineal inversa, es decir que a medida que se fija una concentración mayor de O_2 a instalar, se consigue una concentración menor de CO_2 . Por otro lado, la relación entre la concentración buscada de O_2 y el espesor requerido para conseguirla es logarítmica, de tal forma que en rangos de O_2 bajos, los valores de espesor cambian en forma significativa, sin embargo, con valores grandes los cambios son más moderados.

La utilidad de estas figuras es que permiten identificar los valores que se instalarán de O_2 y de CO_2 dado un espesor de envase plástico. Entre los materiales de envase que se usaron en la tercera fase del presente trabajo estuvo un polietileno de baja densidad (PBD) de 20.6 μm de espesor. De acuerdo con la Figura 11, a la condición de 20 °C se debió tener concentraciones de O_2 y de CO_2 dentro de los envases de 4.6 % y 3.5 %, respectivamente, a 20 °C, en tanto que a 8 °C estas concentraciones debieron ser de 7.0 % y de 3.2 %, respectivamente, lo cual se verificará en secciones posteriores.

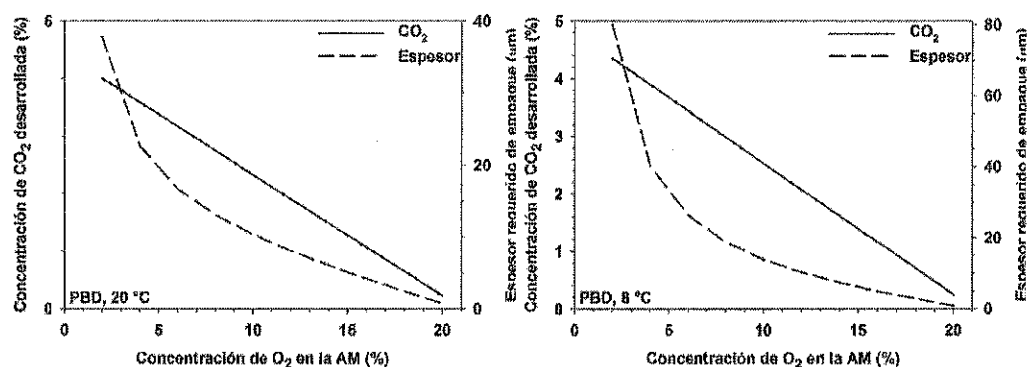


Figura 11. Dependencia del espesor de envase y concentración instalada de CO₂ con la concentración instalada de O₂ en el interior de una AM que maneja lotes de 300 g de frutos de tuna blanca. Los datos corresponden a película de polietileno de baja densidad (PBD) con 0.12 m² de área de intercambio.

Por otro lado, la aplicación de las Ecuaciones (25) y (26) mostró que el tiempo de instalación de la AM depende del volumen libre en el interior del envase y que cuanto mayor sea éste, mayor tiempo de instalación se requerirá (Figura 12). Se encontró que a 20 °C la AM resulta completamente instalada tras un tiempo aproximado de 100 h, en tanto que a 8 °C se requiere un tiempo de hasta 150 h, lo cual se explica por la menor actividad metabólica de los frutos a la menor temperatura (Do Nascimento y Emond, 2003). Este comportamiento fue congruente al encontrado por Salvador *et al.* (2002) quienes también mostraron, para un manejo de frutos de cereza en AM que el tiempo de instalación depende del volumen libre en el envase. Por otro lado, esta situación pone de manifiesto que para el caso de frutos de tuna debería explorarse el uso de una atmósfera activa, es decir, un manejo

donde la mezcla que se instalará se aplique por barrido en el interior los envases, lo cual redundará en una disminución del tiempo de instalación.

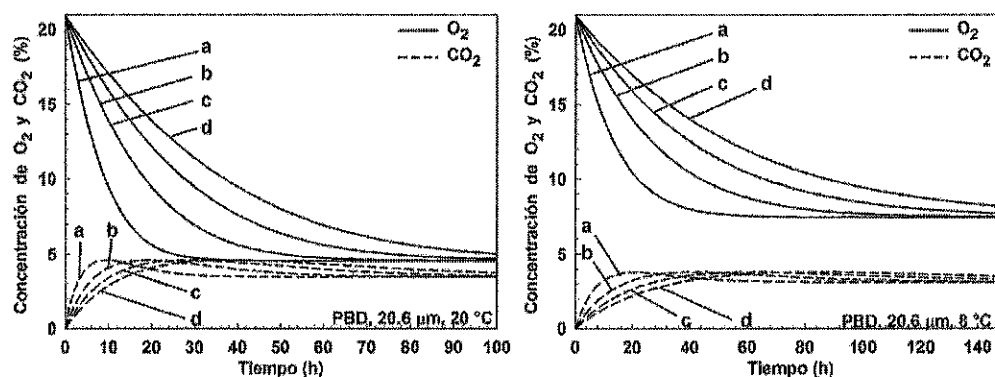


Figura 12. Efecto del volumen libre en la AM sobre el tiempo de instalación. Los volúmenes analizados fueron: (a) 0.5 L, (b) 1.0 L, (c) 1.5 L y (d) 2.0 L.

4.3. Fase de investigación tres

Con base a los resultados de la primera fase experimental se instaló un experimento para explorar, a 20 y 8 °C, el efecto de un manejo en atmósfera modificada (AM) sobre el comportamiento postcosecha de la tuna blanca (*Opuntia albicarpa*). Para ello se usaron como tratamientos manejo en aire normal (TS) y manejo en AM con dos modalidades: bolsa de polietileno de baja densidad (TP) y bolsa Ziploc® (TZ), con unidades experimentales formadas por tres tunas con un peso promedio de 300 g.

4.3.1. Calidad a la cosecha

El criterio para la cosecha fue el de madurez fisiológica, es decir, al término del crecimiento del fruto, de acuerdo con los parámetros visuales

comerciales usados regionalmente de tamaño y llenado de fruto, recomendados por Cantwell (1995). El corte de las tunas incluyó una fracción de la penca de nopal (botón), para favorecer una cicatrización eficiente y evitar la pudrición peduncular. Los ahuates fueron removidos mecánicamente en un equipo mecánico utilizados en la región de producción.

La calidad inicial de los frutos de tuna blanca se presenta en el Cuadro 15, donde se aprecia que éstos presentaron un peso promedio de 158.63 g. (± 30.67). La relación cáscara-fruto dio un promedio de 0.43, lo cual indica que menos de la mitad (43 %) correspondió a la cáscara. Para los atributos de color se obtuvieron los siguientes valores: color verde claro con valores promedio de luminosidad de 52.27 % (± 4.06), 169.58 (± 0.03) en ángulo de tono y 23.38 (± 3.26) en valores de croma. Se evaluó la composición proporcional del fruto midiendo la relación peso cáscara/peso fruto; peso pulpa/peso fruto y peso semilla/peso fruto solamente para la caracterización inicial del fruto obteniéndose los siguientes valores 0.43, 0.48, 0.19 respectivamente. Los frutos que se utilizaron para la caracterización inicial presentaron contenido de sólidos solubles totales promedio de promedio 11.53 °Brix, con un 0.06 por ciento de ácido cítrico. La textura del fruto presentó las siguientes características: la cáscara tuvo un promedio de 3.63 N y la textura de la pulpa tuvo un promedio de 0.23 N.

Corrales y Hernández (2003), encontraron que al momento de la cosecha las tunas sin semilla tuvieron menor relación pulpa-cáscara, en sólidos solubles

y acidez titulable y que la presencia o ausencia de la semilla no presenta efecto significativo.

Cuadro 15. Caracterización química y física inicial del fruto de tuna (*Opuntia albicarpa*).

CALIDAD A LA COSECHA													
No.	Peso	Longitud	Díámetro	Relación (%)			Firmeza (newtons)		*Bx	Acidez	COLOR		
	(g)	(cm)	(cm)	cás-fruto	pulpa-fruto	sem-pulpa	Cáscara	Pulpa	(SST)	(ácido cítrico)	L	HUE	CROMA
1	232,15	9,21	6,95	0,43	0,53	0,07	3,97	0,20	12,00	0,06	50,55	160,25	23,13
2	144,57	8,23	5,99	0,44	0,48	0,16	4,10	0,20	12,00	0,09	54,81	162,28	25,49
3	166,47	8,95	6,34	0,44	0,47	0,19	2,85	0,15	11,50	0,08	54,04	161,36	26,15
4	164,75	8,22	6,09	0,39	0,52	0,16	2,81	0,26	11,80	0,05	47,46	155,79	19,52
5	158,38	8,68	6,19	0,43	0,49	0,16	4,65	0,34	11,80	0,06	59,59	162,93	27,64
6	113,28	6,60	5,66	0,49	0,38	0,35	3,74	0,24	11,00	0,01	46,39	158,10	17,79
7	138,38	7,94	6,02	0,39	0,51	0,19	3,03	0,18	11,20	0,05	54,17	161,88	24,92
8	167,76	9,17	6,11	0,42	0,48	0,23	3,79	0,25	11,00	0,07	51,32	161,53	22,36
9	144,26	8,69	5,78	0,41	0,48	0,23	3,99	0,24	12,00	0,05	49,02	157,57	20,55
10	156,29	8,23	6,21	0,40	0,51	0,17	3,34	0,25	11,00	0,05	55,35	164,12	26,21
Media	158,63	8,39	6,13	0,43	0,48	0,19	3,63	0,23	11,53	0,06	52,27	160,58	23,38
D.Est	30,67	2,77	0,35	0,03	0,04	0,07	0,60	0,05	0,44	0,02	4,06	2,63	3,26

La composición química se encuentra influenciada por la época del año, zona productora, condiciones edafológicas, edad de la planta y clados de donde provienen los frutos (Dominguez, 1992), junto con otros factores (físicos, fisiológicos). La calidad química del fruto está determinada por la época de cosecha y calidad del fruto. Sin embargo uno de los factores más importantes para la determinación de la cosecha es el color de la cáscara, manifestándose en los siguientes colores de verde a rojo púrpura (tunas rojas), amarillo-café (tunas amarillas) o verde-claro (tunas blancas) (Dominguez, 1992).

4.3.2. Condiciones de operación

Las condiciones de operación del presente trabajo se establecieron como la temperatura de almacenamiento y las concentraciones que prevalecieron de O₂ y CO₂ dentro de los empaques, y se determinó la composición de la atmósfera interna del envase.

Bajo esta premisa de la caracterización inicial del fruto en estudio, se manejó el experimento en dos condiciones de almacenamiento: a 8 y 20 °C. Corrales (2003), mencionó que las tunas blancas se pueden manejar con refrigeración hasta con temperaturas de 4 °C, pero se tiene riesgo de sufrir daño por frío, por lo que se optó por trabajarla a una temperatura de 8 °C, para que el efecto de la refrigeración no se confunda con el efecto de la atmósfera modificada.

Durante el almacenamiento de la tuna en atmósfera modificada (Bolsa Ziploc® y Bolsas de polietileno) se tuvo variación en la atmósfera circundante al fruto, esto de acuerdo a lo que mencionó Hertog *et al.* (2003), donde la atmósfera envuelve una reducción de los niveles de oxígeno (O₂) y un incremento en el dióxido de carbono (CO₂), entonces esto presenta una reducción en la respiración oxidativa, efectos en la variación de la concentración de O₂ y CO₂, los resultados obtenidos no presentan un efecto real de la técnica de atmósfera modificada. En la Figura 13 se muestra la variación que tuvieron las concentraciones de O₂ y CO₂ en el interior de los envases. Los materiales de envase de PBD y Ziploc® utilizados tuvieron espesores de 20.6 µm y 53.1 µm. En el caso del PBD, las concentraciones encontradas fluctuaron alrededor de lo que fue simulado en la fase dos de investigación, lo cual permitió validar dicho análisis y da certeza de la utilidad de la caracterización de la actividad respiratoria por la metodología usada.

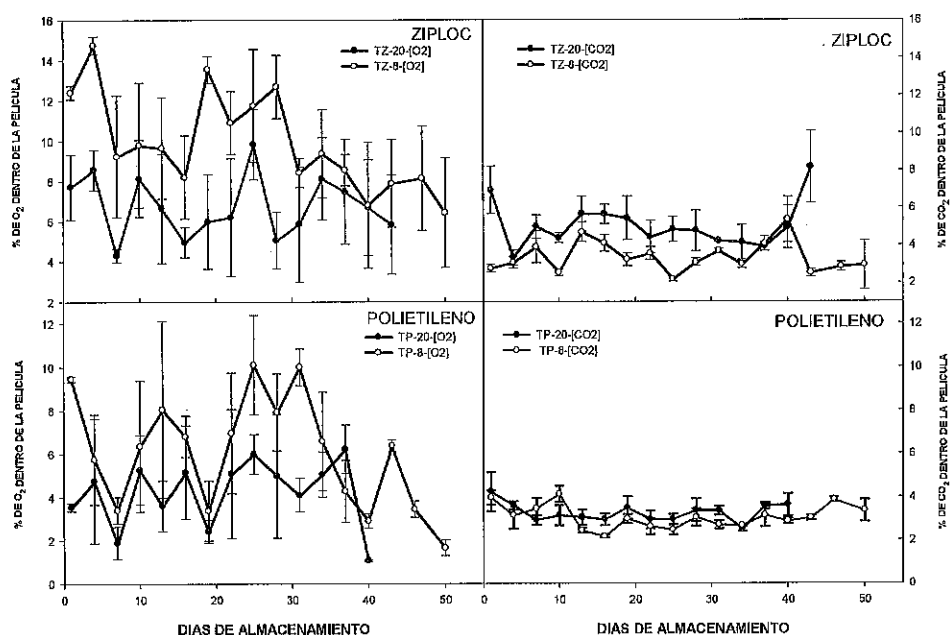


Figura 13. Cinéticas de cambio de O_2 y CO_2 de la atmósfera circundante de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ-20-[O_2], TZ-8-[O_2], TZ-20-[CO_2], TZ-8-[CO_2]; Ziploc®; TP-20-[O_2], TP-8-[O_2], TP-20-[CO_2], TP-8-[CO_2]; polietileno;. Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

El Cuadro 16 muestra el análisis de varianza realizado sobre estas concentraciones. A la condición de 8 °C se obtuvo la menor concentración de CO_2 y la mayor de O_2 para los envases de Ziploc®. Las unidades experimentales presentaron atmósferas pasivas, esto debido a que las concentraciones de O_2 y CO_2 dentro de los envases fueron variando conforme avanzaba el tiempo de almacenamiento (50 días), en el experimento que se evaluó a 8 °C, la concentración de O_2 se mantuvo mayor que a 20 °C, además se tuvo diferencia significativa ($\alpha=0.05$), entre películas siendo el envase con bolsas Ziploc® la que presentó mayor concentración

de O_2 a 8 °C, aunque para la difusión de CO_2 fue menos eficiente que los envases con polietileno, ya que en el interior del envase con bolsas de polietileno, la concentración de CO_2 fue más constante, lo que sugirió que se tiene una mejor difusión para el CO_2 , pero deficiente para retener el O_2 dentro del envase con bolsas Ziploc®. Estadísticamente se tuvo diferencia significativa entre temperatura y el tipo de película que se utilizó para establecer la atmósfera modificada siendo la mejor la que se realizó a 8 °C con bolsas Ziploc. A 20 °C, en el envasado en polietileno de baja densidad las concentraciones alcanzadas fueron menores para O_2 y mayores para CO_2 en comparación con la condición que se envaso en bolsas Ziploc® a la misma temperatura. Las concentraciones de CO_2 que se alcanzaron en ambos experimentos no se tuvieron un efecto negativo sobre la respiración del fruto. Al respecto, Hertog *et al.* (1998) menciona que los frutos exhiben un intercambio de gas en las atmósferas modificadas, de tal manera que la respiración está en función de O_2 , CO_2 y la temperatura. Fonseca *et al.* (2002), señaló que la temperatura es considerada como un factor externo que afecta de manera significativa la actividad respiratoria, pero además también diferencia el efecto por la atmósfera modificada.

4.3.3. Metabólitos anaerobios (etanol y acetaldehído)

La formación de metabólitos como etanol y acetaldehído se lleva a cabo por una respiración anaeróbica, en la que el piruvato formado en la glicólisis sigue la ruta de la formación de acetaldehído y éste a su vez se transforma en etanol (Taiz y Zeiger, 1998).

Cuadro 16. Comparación de medias de tratamientos de respiración (consumo de oxígeno y producción de CO₂) de frutos de tuna afectadas por película de envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo.

Factor	Concentración de atmósfera circundante	
	Dentro de las películas (%)	
	O ₂	CO ₂
Temperatura		
8 °C	8.1094 a	3.2485 b
20 °C	5.9847 b	4.1414 a
DSH	2.79765	2.79633
Película		
TZ [¶]	8.4596 a	4.1448 a
TP	5.6552 b	3.1576 b
TS		
DSH	2.79765	2.79633
C.V. (%)	48.50907	26.49808
Temp×Pelic	*	*

[¶]TZ: Frutos manejados en bolsas Ziploc®, TP: frutos manejados en bolsas de polietileno de baja densidad, TS: frutos manejados sin envase plástico.
^{¶¶}Letras iguales indican diferencia no significativa (Tukey, 0.05). *: significativa al 0.05 (Tukey); ns: no significativo.

Cabe mencionar que el acetaldehído es un compuesto intermedio en el metabolismo, por lo que su aparición o presencia es representativo del tipo de respiración que se lleva a cabo en el fruto, la producción de etanol puede deberse al estrés que sufre el fruto al momento de realizar la cosecha. Kader (2000) mencionó que cuando se almacena producto a altas concentraciones de O₂, la síntesis y acumulación de algunos compuestos de la respiración se

ven afectados; éstos incluyen metabolitos de la fermentación como el acetaldehído, etanol y etil-acetato, pero también mencionó que el almacenamiento de estos frutos con bajos niveles de O_2 previene respuestas al etileno, por lo que en algunos frutos se utiliza comercialmente para prolongar la vida de anaquel.

La Figura 14 muestra la variación en la producción de etanol y acetaldehído a lo largo del almacenamiento y en el Cuadro 17 podremos apreciar la diferencia significativa que se tuvo en cuanto a la producción de acetaldehído y etanol, se tuvo un efecto significativo ($\alpha = 0.05$) entre temperaturas, pero no se presentó diferencia significativa entre películas. Si consideramos la ruta de la fermentación alcohólica como un indicativo de un mal diseño de la atmósfera modificada, podremos encontrar que el proceso ocurre en secuencia, donde el piruvato se convierte en acetaldehído mediante la participación de la enzima piruvato descarboxilasa (PDC) y continuando con la ruta metabólica este compuesto intermedio se transforma en etanol mediante la acción de la enzima alcohol deshidrogenasa (ADH) y la oxidación de NADH (Taiz y Zeiger, 1998).

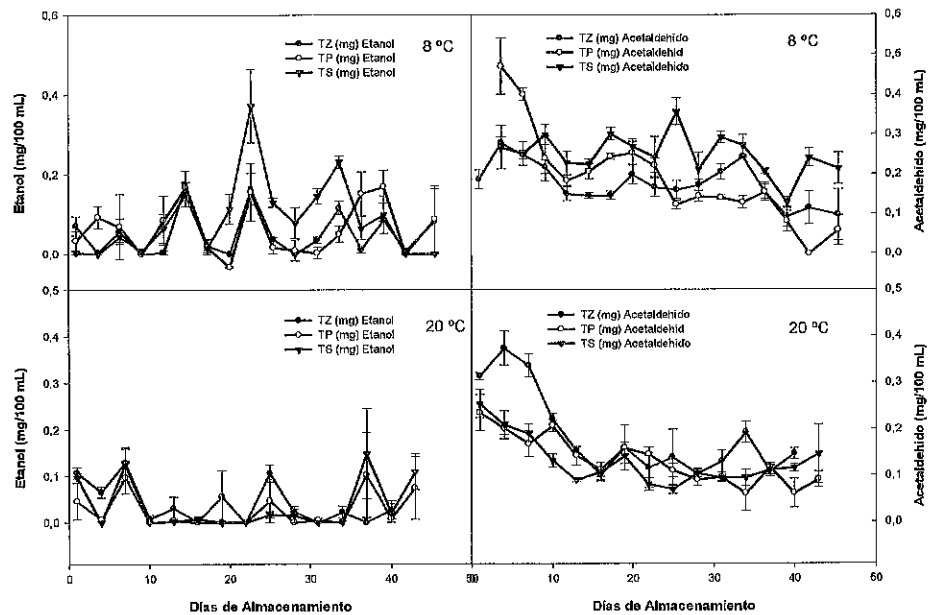


Figura 14. Cinéticas de cambio de metabolitos anaerobios (etanol y acetaldehído) de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento). Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

Si el proceso no presenta suficiente NADH para poder reducir todo el acetaldehído en etanol, el resultado es la acumulación de compuestos intermedios (Tano, 1999). Este efecto lo presentó el tratamiento que se evaluó a 8 °C con envases de bolsas Ziploc®, que es el que presentó mayor concentración de acetaldehído como compuesto intermedio y una menor concentración de etanol como compuesto final de un proceso metabólico anaeróbico, por lo que nos indicó que se tuvo un mejor comportamiento de atmósfera modificada bajo estas condiciones, dando como resultado un producto con buenas características sensoriales.

Cuadro 17. Comparación de medias de tratamientos de metabolitos anaerobios de frutos de tuna afectadas por película de envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo.

Factor	Acetaldehído	Etanol
Nivel	(mg/mL)	(mg/mL)
Temperatura		
8 °C	0.206397 a	0.04361 b
20 °C	0.149174 b	0.07847 a
DSH	0.0142	0.0226
Película		
TZ [¶]	0.175378 a	0.06088 a
TP	0.182250 a	0.04746 a
TS	0.179937 a	0.07676 a
DSH	0.0208	0.0331
C.V. (%)	33.39274	154.0682
Temp×Pelic	*	*

[¶]TZ: Frutos manejados en bolsas Ziploc®, TP: frutos manejados en bolsas de polietileno de baja densidad, TS: frutos manejados sin envase plástico.
^{¶¶}Letras iguales indican diferencia no significativa (Tukey, 0.05). *: Significativa al 0.05 (Tukey); ns: no significativo.

4.3.4. Variables físicas

Las atmósferas modificadas envuelven un incremento en los niveles de CO₂, reduciendo la respiración, la producción de etileno y acción, degradación de la clorofila y madurez y senescencia del fruto (Yahia, 1998). La reducción de peso que experimentan los frutos en la postcosecha, llamada comúnmente como pérdida fisiológica, se atribuye normalmente a la pérdida causada por procesos de transpiración. Las pérdidas fisiológicas de peso que presenta el

fruto de tuna en postcosecha dependen de varios factores, dentro de los cuales se tienen como más importantes a las condiciones de temperatura, humedad relativa y ventilación durante las condiciones de almacenamiento, así como el estado de desarrollo del fruto al momento de la cosecha y la variedad (Corrales, 2003).

4.3.4.1. Pérdida de peso

Se encontró que la pérdida de peso fue constante en los frutos de ambos tratamientos, pero el efecto presentó diferencia entre temperaturas (20 y 8 °C) y entre películas (TZ-TS-TP). La pérdida de peso fue mucho mayor en los tratamientos que se realizaron a temperatura de 20 °C. En los tratamientos que se manejaron a 8 °C con película de polietileno (TP) se tuvo el mejor comportamiento en pérdida de peso, es decir que allí se tuvieron los menores valores.

4.3.4.2. Textura (Pulpa-Cáscara)

Se analizó la textura de la pulpa y de la cáscara, con respecto a la firmeza (N) de la cáscara de los frutos de tuna se presentó una diferencia significativa entre las dos temperaturas ($P \leq 0.05$) de acuerdo con el análisis estadístico y no entre condiciones de envase de la atmósfera modificada. En la Figura 12 podemos apreciar que la firmeza de la cáscara fue descendiendo gradualmente con respecto al tiempo de almacenamiento (50 días de almacenamiento), dicho comportamiento fue similar entre películas, pero entre temperaturas el descenso fue más pronunciado en las atmósferas

que se llevaron acabo a 20 °C, la firmeza de la cáscara se mantuvo más constante a temperatura de 8 °C.

Cuadro 18. Comparación de medias de tratamientos de variables físicas de frutos de tuna afectadas por película de envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo.

Factor Nivel	Pérdida de peso	Textura de cáscara (N)	Textura de pulpa (N)	H*	C*	L*
Temp.						
8 °C	3.2819 b	3.8896 a	0.295948 a	99.4016 a	19.6112 a	45.2454 a
20 °C	4.2957 a	3.16606 b	0.255530 b	84.1429 b	18.4750 b	43.9401 b
DSH	0.2336	0.1154	0.0176	1.7843	0.5615	0.8289
Película						
TZ ^{II}	1.1101 c	3.48396 a	0.26771 a	93.381 b	20.4741 a	46.2350 a
TP	1.5667 b	3.62129 a	0.28624 a	96.248 a	20.2229 a	45.7318 a
TS	8.5093 a	3.56046 a	0.27802 a	87.496 c	16.5935 b	41.9899 b
DSH	0.3417	0.1688	0.0258	2.6098	0.8213	1.2123
C.V. (%)	26.59818	13.86698	27.17329	8.25337 1	12.5665 5	7.930178
Temp×Pelic	*	*	*	*	*	*

^{II}TZ: Frutos manejados en bolsas Ziploc®, TP: frutos manejados en bolsas de polietileno de baja densidad, TS: frutos manejados sin envase plástico.
^{III}Letras iguales indican diferencia no significativa (Tukey, 0.05). *: significativa al 0.05 (Tukey); ns: no significativo. H*: ángulo de tono (hue); C*: cromaticidad; L*: luminosidad.

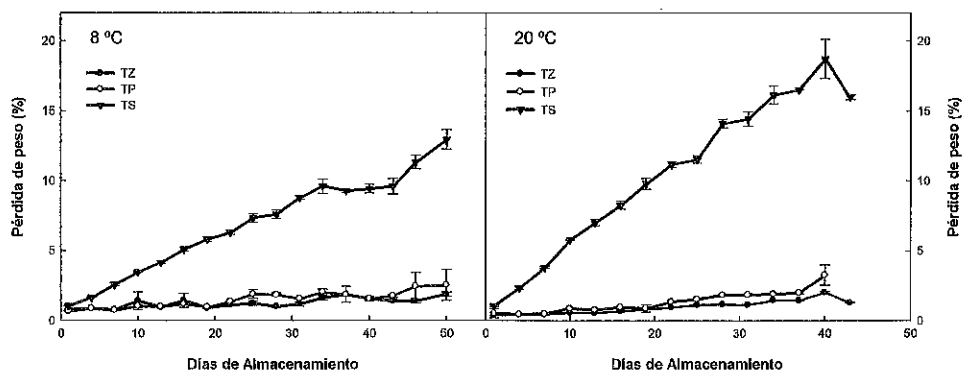


Figura 15. Cinéticas de cambio de pérdida de peso (%) promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento). Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

La Figura 12 además nos muestra que no se tuvo un efecto de la atmósfera modificada, sino que el efecto fue generado por la frigoconservación aplicada a la atmósfera, como resultado de la degradación de la pared celular (Tucker, 1993; Smith *et al.*, 2003). En esencia los cambios de textura están relacionados con el deterioro de tejidos, mientras que los cambios en la apariencia están asociados con procesos de degradación o síntesis de pigmentos.

En el caso de frutos, el ablandamiento es un evento característico del efecto de la maduración, dicho fenómeno de pérdida de firmeza continua durante la senescencia.

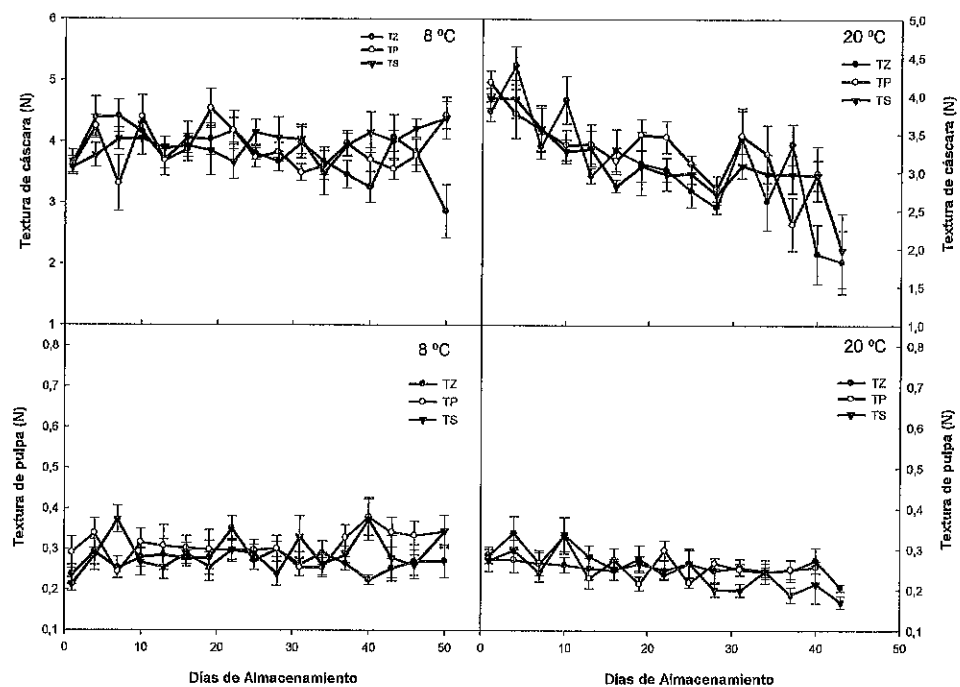


Figura 16. Cinéticas de cambio de textura promedio de pulpa y de cáscara (N: Newtons), de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento). Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

En la condición de 20 °C los cambios en la firmeza fueron mucho más rápidos. La textura de la pulpa también sufrió cambios durante el período de almacenamiento, estadísticamente (Cuadro 19) se tuvo efecto significativo ($\alpha=0.05$) entre temperaturas, pero no así para el efecto entre temperaturas, la textura de la pulpa se mantuvo casi similar entre los tres tratamientos, aquí el detalle es que si hubo cambios en la apariencia visual con la degradación del color y por consiguiente cambia a color amarillo-café.

En la Figura 12 podemos apreciar que los cambios de textura en la pulpa fueron más rápidos en las atmósferas que se realizaron a temperatura de 20 °C, aunque dicho efecto en la textura no fue muy pronunciado. El efecto de la temperatura, el tipo de envase y el tiempo de almacenamiento se relacionaron directamente. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Cantwell (1986) quien encontró que la firmeza de las tunas decrecen poco durante el almacenamiento a 20 °C por más de un mes, Corrales (1997) también obtiene los mismos resultados para las variedades de tuna Cristalina, Picochulo.

4.3.4.3 Color

Ángulo de tono (Hue). Las características del ángulo de tono que presentaron los frutos al inicio del experimento se ubicaron en valores de 105-110°, lo que permitió ubicar a los frutos dentro de un color verde amarillento Figura 13. Durante el período de almacenamiento se observaron reducciones graduales en los valores del ángulo Hue en ambos tratamientos, siendo más pronunciado en el tratamiento a 20 °C, en el tratamiento a 8 °C, la que tuvo mejor comportamiento fue el que se aplicó con las bolsas de polietileno, conservo mejor su matiz, mismo comportamiento lo obtuvo a 20 °C, solo que la reducción en mayor proporción. Corrales 1997, reporta el mismo efecto de disminución en el ángulo Hue para las variedades como Burrón, Cristalina, Picochulo y Montesa.

Para el almacenamiento a 20 °C aproximadamente después del día 20, se nota una oxidación gradual de la cáscara. Los cambios que se notaron en la

tuna son el resultado de diversas causas como son la maduración, el estrés, la senescencia donde pueden participar las enzimas que están relacionadas con la maduración y cambio de pigmentación, como lo son enzimas oxidantes como la polifenoloxidasas (González, 2001), el cambio de color comienza de un color amarillento, a un color café amarillento, esto debido a la degradación de la clorofila, junto con esta degradación se tiene una disminución en el peso generado por la deshidratación y un arrugamiento de la cáscara debido a pérdida de agua por transpiración.

Cromaticidad o pureza de color. La pureza de color presenta el mismo efecto que en la luminosidad, se tiene un efecto positivo en dicho atributo debido a la temperatura de almacenamiento ($P \leq 0.05$), el diseño de la atmósfera modificada también presenta un efecto positivo en la conservación de la pureza del color con respecto a los tratamientos que se manejaron sin atmósfera modificada, no se tiene efecto significativo entre películas (tratamiento con bolsa Ziploc® vs Polietileno) (Cuadro 19). En la Figura 13 podemos apreciar que la disminución en la pureza del color (croma) es mucho más rápido a temperatura de 20 °C y en el tratamiento que se realizó con película de polietileno de baja densidad.

Luminosidad. Para el caso de la luminosidad el análisis estadístico nos arroja una diferencia significativa ($P \leq 0.05$), entre temperaturas, siendo el tratamiento a 8 °C el que presentó mejor conservación de la luminosidad (Cuadro 9); la aplicación de las atmósferas modificadas también presentaron un efecto significativo sobre la luminosidad, en ambos tratamientos (Ziploc®

y polietileno), la luminosidad se conservo mucho mejor que en aquellos tratamientos donde no se colocaron en atmósfera modificada (Figura 13). De acuerdo con Saenz *et al.*, 1993, el almacenamiento de tuna verde presenta un decremento en la luminosidad (L), también presenta reducción en los valores del croma, y presentan un incremento en el ángulo Hue, este efecto se presento en las dos temperaturas utilizadas (20 y 8 °C), pero el efecto fue mucho mayor a temperatura de 20 °C, con lo reportado por Sáenz, se nota un cambio en el color de verde a amarillo esto causado por la degradación de la clorofila y este efecto fue observado con mayor efecto a temperaturas altas (20 °C). Todas las muestras investigadas exhibieron un decremento en la luminosidad atribuible a la degradación de los productos de ácido ascórbico (R. Mohammed *et al.*, 2006).

De acuerdo con Saenz *et al.* (1993), el almacenamiento de tuna verde presenta un decremento en la luminosidad (L), también presenta reducción en los valores del croma y presenta un incremento en el ángulo Hue. Este efecto se presentó en las dos temperaturas utilizadas (20 y 8 °C), pero el efecto fue mucho mayor a temperatura de 20 °C. En forma congruente con lo reportado por Saenz *et al.* (1993), se notó un cambio en el color de verde a amarillo, lo cual estuvo asociado con la degradación de la clorofila, y este efecto fue observado con mayor intensidad a la temperatura mayor (20 °C). Por otro lado, todas las muestras investigadas exhibieron un decremento en la luminosidad, lo cual, según Mohammed *et al.* (2006) es atribuible a la degradación de los productos de ácido ascórbico.



Figura 17 Cambio en color y apariencia física de la tuna blanca almacenada en atmósfera modificada con películas plásticas (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento) a 20 y 8 °C.

4.3.5 Variables químicas

4.3.5.1 Sólidos solubles totales (°Brix)

El porcentaje de sólidos solubles expresados como Brix (°Bx), en el día cero los valores que presentaron fue en promedio de 13-14 °Bx, presentando una disminución durante su almacenamiento hasta alcanzar valores de casi 9 °Bx, esta disminución fue mucho más rápido en los tratamientos que se almacenaron a 20 °C

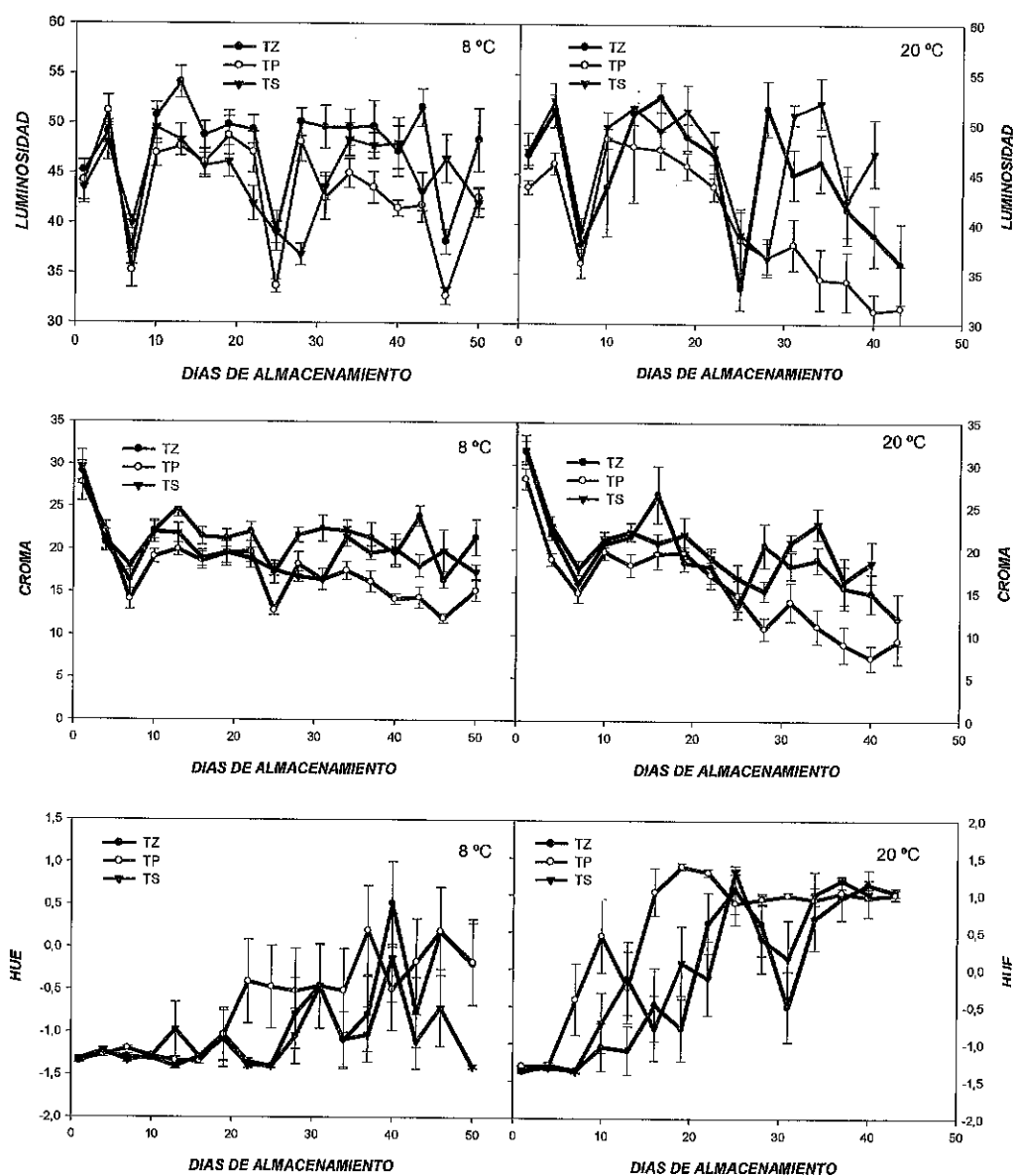


Figura 18. Cinéticas de cambio de atributos de color (luminosidad, croma y ángulo Hue) de tuna blanca para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento). Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

Cuadro 19. Comparación de medias de tratamientos de variables químicas de frutos de tuna afectadas por película de envase y temperatura, y significancia de interacciones entre estos factores y también con factor tiempo.

Factor	SST	Acidez	°Brix/acidez	Azúcares	Azúcares
Nivel	(°Brix)	(mg/g)		totales	reductores
Temperatura					
8 °C	12.6563	0.0575 a ^{III}	244.558 a	166.212	101.814 a
	a			b	
20 °C	11.3839	0.0561 a	229.381 b	182.645	94.923 b
	b			a	
DSH	0.3687	0.0029	11.947	9.9624	3.3908
Película					
TZ ^{II}	12.6087	0.0504 c	262.607 a	167.039	98.675 ba
	a			b	
TP	11.4167	0.0625 a	218.911 b	167.119	95.819 b
	b			b	
TS	11.9524	0.0578 b	230.219 b	186.802	101.213 a
	b			a	
DSH	0.5485	0.0043	17.48	14.563	4.9687
C.V. (%)	6.027177	21.92424	21.45156	22.51073	13.65867
Temp×Pelic	*	*	*	*	*

^{II}TZ: Frutos manejados en bolsas Ziploc®, TP: frutos manejados en bolsas de polietileno de baja densidad, TS: frutos manejados sin envase plástico.

^{III}Letras iguales indican diferencia no significativa (Tukey, 0.05). *: significativa al 0.05 (Tukey); ns: no significativo.

En el periodo de almacenamiento que fue de 50 días, se presentó variación entre las temperaturas, siendo la de 8 °C la que tuvo mejor respuesta a la degradación de los sólidos solubles, Wiley (1997) mencionó que un descenso en la temperatura disminuye la respiración y retrasa la senescencia de los frutos y hortalizas y por lo tanto la degradación de los azúcares presentes.

En el Cuadro 20 podemos apreciar que se tuvo un efecto significativo ($P \leq 0.05$), entre temperaturas, el descenso para la temperatura de 8 °C fue de 14 hasta un mínimo de 11 °Brix, esto debido a que la tuna es un fruto no climatérico y de acuerdo con Corrales, 1997, los frutos no climatéricos se caracterizan por la falta de almidón como carbohidrato de reserva, además no es significativo el incremento en el contenido de azúcar en frutos no climatéricos después de la cosecha (Tucker, 1993; citado por Cantwell, 1995). A temperatura de 8 °C el tratamiento con las bolsas Ziploc®, fue el que presentó mejor comportamiento, para la conservación de los °Brix.

Para el atributo del tipo de película, se tuvo diferencia significativa entre las que se realizaron con polietileno de baja densidad y las de Ziploc, siendo esta última la que presentó mejor respuesta a los tratamientos de atmósfera modificada, los primeros 11 días el descenso fue muy lento, posterior a esos días la pérdida de brix se fue acrecentando un poco mas rápido hasta llegar a brix debajo de 10, la disminución en los grados brix, son inferiores a los reportados por Singh (2003) reportando 13 °Bx, Anon (1989) reportan 13.9 °Bx, y mucho inferior a lo reportado por Sáenz y Sepúlveda (1993).

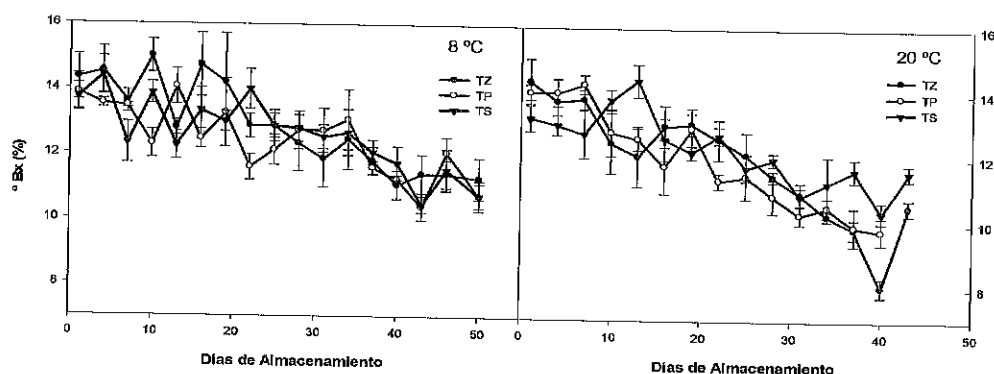


Figura 19. Cinéticas de cambio de grados brix promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento). Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

Inglese *et. al.* (1995) y Felker *et al.* (2005), establecieron los principales atributos para la fruta de tuna, para el caso de brix se encuentran valores mayores a 13 %. Estos efectos de la temperatura y el tipo de película aplicado a la atmósfera modificada se pueden observar en la Figura 15, la disminución en los grados brix fue más notoria en los tratamientos aplicados a temperatura ambiente. Chávez-Franco y Saucedo-Veloz (1985) reportaron una disminución en los grados brix en tunas almacenadas a 20 °C y 60-70 % de humedad relativa por 15 días, este comportamiento se presentó en las mismas condiciones del experimento. Por otro lado, Barbera *et al.*, (1992) reportaron, en base a 3 cultivares de tuna (Gialla, Rialla y Bianca) desarrollado en Italia un incremento en los SST durante su desarrollo y alcanza su estado de madurez óptima con valores alrededor de 13 %, Berat

Duru y Nuzhet Turker (2005) observaron un incremento de los SST durante 63 días de almacenamiento.

4.3.5.2. Acidez

El análisis estadístico nos muestra que se presentó diferencia significativa ($P \leq 0.05$), entre películas siendo el tratamiento que se realizó con bolsas Ziploc® baja densidad fue el que presentó mayor acidez, con un promedio de 0.06 %, el tratamiento testigo presentó un comportamiento normal a la disminución de la acidez conforme avanzaba el tiempo de almacenamiento.

La acidez para los tratamientos que se realizaron con las películas de bolsas ziploc® son las que presentaron mejor manejo en el aumento de la acidez, (Figura 16), este efecto concuerda con el reportado por Kuti (2005) el cual menciona que la acidez disminuye durante el desarrollo del fruto dando valores de 0.2 -0.02 % hasta llegar al 0.1 %. La tuna al momento de la cosecha presentó una acidez promedio aproximada de 0.06 % en los tratamientos que no se envasaron en atmósfera modificada la acidez fue muy variable presentando picos de subida y bajada en dicho atributo, no así para los tratamientos donde se utilizó la técnica de AM, donde la acidez no presenta dicha variación. Este tipo de comportamiento se puede deber a los cambios asociados con la actividad respiratoria, debido a la fase de estabilización de la atmósfera circundante. Los ácidos orgánicos que el fruto utiliza como sustrato respiratorio se ven afectados cuando disminuye la actividad respiratoria, al disminuir esta se reduce el consumo de ácidos orgánicos principalmente en el ciclo de Krebs, lo cual hace suponer que esto

provoque el incremento temporal que se tuvo en el tratamiento a 8 °C. Al respecto de esto, se sugiere que la síntesis de ácidos orgánicos no ocurre completamente a nivel de proceso fotosintético, sino que también se forman *in situ* (Hobson, 1993) y que esto se desarrolla como parte de los procesos de glicólisis y del ciclo de las pentosas fosfato, ambos parten de los procesos respiratorios (Day y Copeland, 1993). La acidez titulable es un parámetro que nos da información sobre la percepción ácida detectada por los consumidores (Hobson, 1993), más sin embargo la acidez en la tuna esta presente en bajas proporciones por lo que la tuna no es fruto que presente cambios ácidos que puedan inferir en la calidad de aceptación de los consumidores.

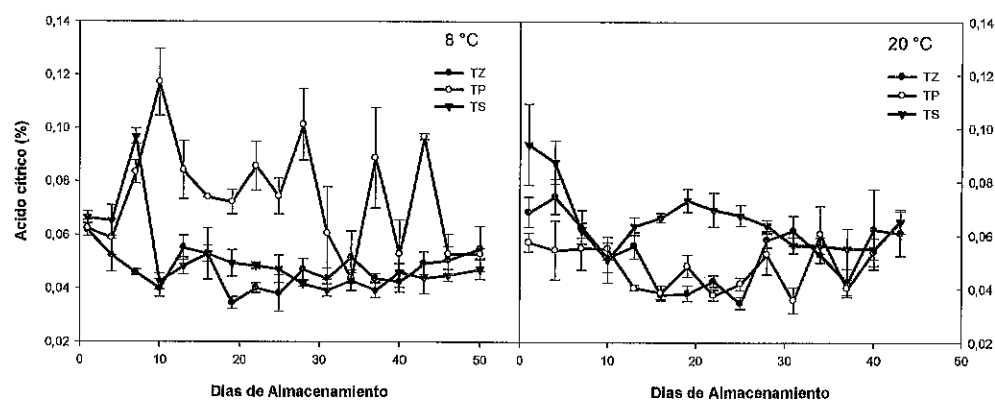


Figura 20. Cinéticas de cambio de acidez (% ácido cítrico) promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento). Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

4.3.5.3. Azúcares totales-azúcares reductores

En el Cuadro 20 podemos observar que existe una diferencia significativa entre las temperaturas que se aplicaron a los diferentes tipos de películas para establecer las atmósferas modificadas, siendo la temperatura de 8 °C la que presentó el mayor contenido de azúcares reductores pero menor de azúcares totales, los valores más altos se presentaron al inicio del experimento, los frutos tratados con películas ziploc® y polietileno de baja densidad no presentaron diferencia significativa ($P \leq 0.05$), la única diferencia que se presentó en el contenido de azúcares totales se debió a el efecto por temperatura. Para el caso donde se manejo el producto a 8 °C los primeros 10 días se tuvo una rápida disminución del contenido de azúcares totales, posterior a eso se presentó una estabilización en el contenido hasta llegar a un punto donde se mantiene casi constante el contenido de azúcares totales (Figura 17). La velocidad de las reacciones enzimáticas esta directamente relacionada con la temperatura a la cual se desarrolla. La respiración es un proceso metabólico fundamental tanto en el fruto recolectado como en el vegetal vivo y se refiere a como la degradación oxidativa de compuestos complejos como el almidón, los azúcares y los ácidos orgánicos o moléculas más simples como el dióxido de carbono y agua con liberación de energía (Wills, 1998).

El comportamiento de los azúcares es de suma importancia para el desarrollo por su efecto en la calidad poscosecha del fruto. Lakshminarayana *et al.* (1979) observaron que los sólidos solubles totales siempre fueron mayores que los azúcares totales, este mismo efecto se

presentó en las tunas almacenadas en las atmósferas modificadas. Durante el primer período el contenido de azúcares totales fue menor al 0.1 %, por lo que la mayor parte de los sólidos solubles estaba constituida por azúcares diferentes. Corrales (2003) menciona que cuando el fruto se encuentra en la madurez comercial hay incremento rápido en el contenido de los azúcares. Tal como se esperaba los azúcares reductores y totales se comportaron significativamente diferentes ($P \leq 0.05$), los azúcares reductores mostraron diferencia significativa entre las temperaturas aplicadas, siendo 8 °C donde se tuvo mayor presencia de azúcares reductores; la atmosfera modificada que se realizó con bolsas de polietileno de baja densidad fue la que presentó diferencia significativa entre el patrón de referencia que se realizó a la misma temperatura pero sin envase y también tuvo diferencia significativa con el tratamiento que se realizó con bolsas Ziploc®. Este comportamiento está directamente relacionado con la actividad respiratoria de los frutos, la cual está en función del cambio en la concentración de la atmósfera interna generada por la cubierta plástica.

Las cinéticas de cambio de la concentración de oxígeno y bióxido de carbono se ajustaron bien a las ecuaciones de Michaelis-Menten. En el interior de cada condición térmica no hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre las pendientes de las rectas de Lineweaver-Burk correspondientes a comportamientos con y sin CO₂ presente, lo cual es indicativo que el efecto de dicho gas es de tipo acompetitivo.

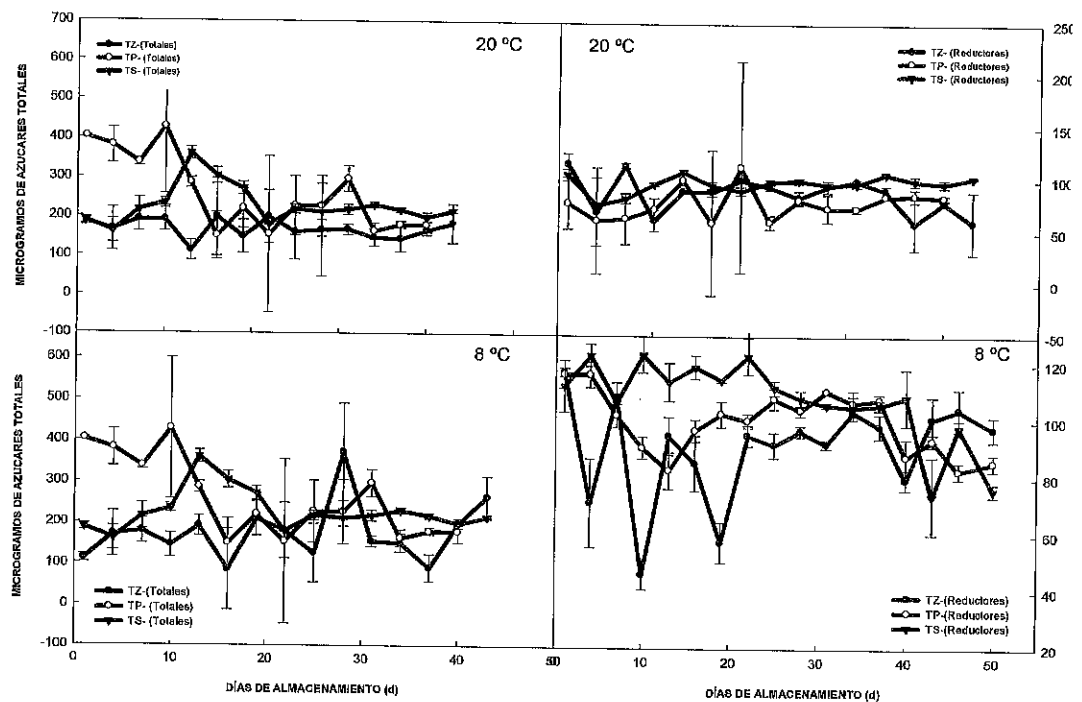


Figura 21. Cinéticas de cambio de contenido de azúcares totales y azúcares reductores (mg/100 mL) promedio para el factor temperatura (20 y 8 °C) y el factor película (TZ: Ziploc®; TP: polietileno; TS: sin tratamiento). Las barras asociadas a los valores puntuales promedio corresponden a error estándar.

5 CONCLUSIONES

La fase uno indicó que la actividad respiratoria de los frutos de tuna blanca puede representarse mediante un modelo de Michaelis-Menten tipo acompetitivo. La velocidad de consumo de O_2 fue más sensible a la variación de la concentración de O_2 a la condición de 8 °C que a la de 20 °C, de tal forma que para abatir a la mitad dicha velocidad el O_2 se debe disminuir a 10 76 % a 8 °C, pero hasta 3.15 % a 20 °C.

A 8 °C la velocidad de consumo de O_2 se redujo más rápidamente que a 20 °C a medida que baja la disponibilidad de O_2 , de tal forma que la concentración requerida de O_2 para que la velocidad mencionada se reduzca a la mitad fue mayor a 8 °C que a 20 °C.

La menor concentración de CO_2 y mayor concentración de O_2 dentro de los empaques se obtuvo a 8 °C en bolsas Ziploc® presentando un efecto positivo sobre la respiración alcanzando concentraciones de 8-10 %, de O_2 y 3-4 % de CO_2 durante 50 días de almacenamiento.

El mejor diseño que se obtuvo para la formación de la atmósfera modificada se realizó con las bolsas Ziploc® a 8 °C, obteniéndose la menor concentración de etanol y la mayor en acetaldehído como compuesto

intermedio siendo indicador de que no se obtuvo suficiente NADH para reducir el acetaldehído a etanol y se concluye que no se presentó anaerobiosis con el diseño de la atmósfera modificada.

La pérdida de peso, color y textura de pulpa y cáscara fue mayor a 20 °C en las atmósferas que se generaron con bolsas de polietileno de baja densidad, estas variables tuvieron un mejor comportamiento en las atmósferas modificadas donde se utilizó bolsas Ziploc® a 8 °C, para el caso del color no se tuvo efecto sobre la luminosidad y el croma, pero si hubo un efecto significativo, esto fue una disminución del color verde claro a un color café amarillento.

La generación de la atmósfera modificada presentó un efecto positivo sobre las variables químicas que se cuantificaron (°Brix, acidez y azúcares reductores y totales), en la acidez se obtuvo una disminución y en los grados brix se obtuvo una mejor conservación del dulzor en las atmósferas generadas con las bolsas Ziploc® a 8 °C

Las ventajas que presentó la utilización de la técnica de la atmósfera modificada en tuna consistieron en una mejor conservación de atributos de calidad del fruto de tuna blanca, una reducción significativa de la pérdida de peso, conservación de color y firmeza de la tuna, una considerable disminución en la velocidad de respiración y menor producción de metabolitos anaerobios, siendo el mejor tratamiento el que se realizó a 8 °C con bolsas Ziploc®.

6. LITERATURA CITADA

- AOAC. 1980. Official Method of Analysis. Association of Official Analytical
- Banks N.H., Cleland D.J., Cameron A.C., Beaudry R.M., and Kader A.A.(1995). Proposal for rationalized system of units for postharvest research in gas exchange. Hortscience 30:1129-1131.
- Barbera G., F. Carimi, P. Inglese, M. Panno. 1992. Physical, morphological and chemical changes during fruit development and ripening in three cultivars of prickly pear, *Opuntia ficus indica* (L.) Miller. J. Hort Sci. 67(3): 307-312.
- Beaudry, R.M. (1993). Effect of carbón dioxide partial pressure on blueberry fruit respiration and respiratory quotient. Postharvest Biology and Technology 3:249-258.
- Beaudry, R.M. (1999). Effect of O₂ y CO₂ partial pressure on selected phenomena affecting fruit and vegetable quality. Postharvest Biology and Technology 15:293-303.
- Beaudry, R.M. (1999). Effect of O₂ y CO₂ partial pressure on selected phenomena affecting fruit and vegetable quality. Postharvest Biology and Technology 15:293-303.
- Beaudry, R.M., Cameron A.C., Shirazi A. and Dostal-Lange D.L. (1992).Modified-atmosphere packaging of blueberry fruit: effect of temperature on package O₂ and CO₂. Journal of the American Society for Horticultural Science 117 (3):436-441.

- Berat Duru and Nuzhet Turker (2005). Changes in Physical properties and Chemical Composition of Cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) during maturation. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 1(3).22-33.
- Boersig, M.R., A. A. Kader, and R. J. Romani. 1988. Aerobic-anaerobic respiratory transition in pear fruit and cultured pear fruit cells. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113: 869-873.
- Borrego, E. y V. Burgos.1986. *El Nopal*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila México. 153 pp.
- Bravo, H. 1978. *Las Cactáceas de México*. Universidad Autónoma de México. México D.F. 98 pp.
- Burden R.L. and Faires J.D. (1985). *Numerical Analysis*. Boston : PWS, pp. 99-108.
- Cameron, A.C., Beaudry R. M., Banks N.H. y Yelanich M.V. (1994) Modified Atmosphere Packaging of Blueberry Fruit. Modeling Respiration and package oxygen partial pressures as a function of temperature. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119:34-39.
- Cameron, A.C., Talasalia P.C. and Joles D.J. (1995). Predicting the film permeability needs for modified-atmosphere packaging of lightly processed fruits and vegetables. *HortScience* 30:25-34.
- Cameron, A.C., Talasalita P.C. and Joles D.J. (1995). Predicting the film permeability needs for modified-atmosphere packaging of lightly processed fruits and vegetables. *HortScience* 30:25-34.

- Cantwell M. (1986). Postharvest Aspects of Prickly Pear Fruits and Vegetables Cladodes. *Perishables Handling Univ. of Calif. Davis.* 59:6-9.
- Cantwell M., F. Rodriguez and F. Robles. 1992. Postharvest physiology of prickly pear cactus steams. *Scientia horticulturae* 50(1-2): 1-9
- Cantwell, M. 1991. Quality and postharvest physiology of nopalitos and tunas. *Proc. Second Annual Texas Prickly Pear conference.* Texas Prickly Pear Council. Mc Allen, Texas. USA. pp 50-66
- Cantwell, M. 1995. Fresh cut biology and requirements. pp 9-12 In: *Fresh Cut Products: Maintening Quality and Safety.* Postharvest Hort. Series No. 10(4). U.C. Davis.
- Cantwell, M. 1998. Food Safety: Microbiological Concerns. pp 1-2 In: *Fresh Cut Products: Maintaining Quality and Safety.* Postharvest Hort. Series No. 10(8). U.C. Davis. 1-2 pp.
- Chávez, F. y C. Saucedo. 1985. Conservación en refrigeración de dos variedades de tunas. *Horticultura Mexicana* 1(1):6-13
- Corrales G., J. Andrade J. and E. Bernabé. 1997. Response of six cultivars of tuna fruits to cold storage. *Journal of the professional association for cactus development.* Vol 2:160-168
- Corrales G., J. y C. Flores. 2003. Nopalitos y tunas: producción, comercialización, postcosecha e industrialización. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 159 p.
- Corrales G., J. y Hernández Silva, J. L. (2005). Cambios en la Poscosecha de Variedades de Tuna con y sin Semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana.* 28 (1): 9-16.

- Corrales, J. 1992. Descripción y análisis de la cosecha y del manejo en fresco de nopalito y tuna. Pp. 24-58. In: Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 5° Congreso Nacional y 3° Congreso internacional. CONACYT-CIESTAAM-UACH. Chapingo, México.
- Day, D.A., Copeland L. (1993). Respiración. In: Azcon-Bieto J. y Talon M. (eds). Fisiología y Bioquímica Vegetal. Interamericana-McGraw-Hill. New York. Pp:173-192.
- Do Nascimento y Emond J.P. (2003). Storage temperature. In: Bartz J.A. (eds.). Postharvest physiology and Pathology of vegetables. Marcel Dekker Inc New York. pp. 209-228.
- Domínguez T., J.J.(1992). Efecto de la incidencia de daños por frío sobre la fisiología y calidad de frutos de tuna (*Opuntia amyclea* T.). Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillos, México.
- Fernández M., R. y J.C. Mondragón. 1996. Colecta Conservación, Estudio y Utilización de Recursos Genéticos de Nopal (*Opuntia* spp.) Proyecto de investigación en Nopal Tunero. Centro-Norte de Guanajuato. INIFAP. SARH. Guanajuato, México. 136 p.
- Flores V., M. Ramirez, J. M. de Luna, P.J. Ponce. 1997. Diagnóstico y Programa de Desarrollo del Sistema Producto Tuna. SAGAR, UACH; CIESTAAM. Chapingo, México. 101 p.
- Fonseca, C. S., A. F. Olivera and K. J. Brech, . 2002. Modeling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. Journal of Food Engineering. 52: 99-119.

- González G., R., Morales O., T., Olivares S., E., Aranda R., J. y Gallegos V., C. (2001). Conservación de una variedad de tuna (burrona) bajo diferentes manejos poscosecha. *Ciencia UNAL*. 4(3): 322-329.
- Hertog M. L., A. T. M. Peppelmbos H. W. Evelo R.G. and Tuskens L.M.M.M. (1998). A dynamic and generic model on the gas exchange of respiring produce the effects of oxygen, carbon dioxide and temperature. *Postharvest Biology and Technology*. 14:335-349.
- Hertog M. L., A. T. M. Sue E. Nicholson. Kerry Whitmore (2003). The effect of modified atmosphere on the rate of quality change in Hass avocado. *Postharvest Biology and Technology*. 29:41-53.
- Hobson, G. E. (1993). Maduración del fruto. *In: Azcon-Bieto y Talon M. (eds). Fisiología y Bioquímica Vegetal*. Interamericana-McGraw-Hill. New York. Pp:463:478.
- Irtwange S.V. (2006) Application of modified atmosphere packaging and related technology in Postharvest Handling of fresh fruits and vegetables. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*. Invited Overview 4(7):1-13.
- Inglese, P., F. Basile and M. Schirra. 2002. Cactus pear fruit production, 163-183 pp. *In: Cacti: Biology and Uses*. Park S. Nobel (ed.). University of California Press. California, USA.
- Kader A. A., Saltveit M. E. 2003. Modified atmosphere. *In: Bartz J. A., Bretch J. K. (eds.). Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables*. Second Edition. Marcel Dekker Inc. New York. Pp: 229-246.

- Kader A.A. and Salveit M.E. (2003). Respiration and gas exchange. In: Postharvest physiology and pathology of vegetables. J.A. Bartz, J.K. Brencht (eds). University of Florida, Gainesville. Florida. pp. 7-29.
- Kader, A. A. 2000. Cactus (Prickly) pear. Produce Facts. Recommendations for mainting postharvest quality available online: <http://postharvest.ucdavis.edu/producefacts/index/shtml>. Date of actualization: August 03.2008.
- Kader, A. A. 2002. Postharvest Technology of Horticultural crops. E.U. University of California. Davis, USA. 389 p.
- Kader, A. A. 2005. Cactus (Prickly) Pear: Recommendations for Maintaining Postharvest Quality. Postharvest Technology Research & Information Center. Department of Plant Sciences, University of California, Davis, CA. USA. 189 p.
- Kader, A.A. (2002). Modified atmospheres during transport and storage. En: Kader A.A. (ed.), Postharvest technology of horticultural crops. University of California Agriculture and Natural Resources, Davis. Pp. 134-144.
- Lakshminarayana, S. and I.B. Estrella. 1978. Postharvest respiratory behavior of the fruits of prickly pear (*Opuntia robusta* Mill). HortScience. 53: 327-330.
- Lakshminarayana, S. and S.L. Alvarado y Sosa L. and Barrientos Pérez F. 1979. The development and postharvest physiology of the fruit of cactus pear (*Opuntia amyclea* T). In: Inglet, G. E. and Charalambus , G. (Eds). Tropical Foods: Chemistry and Nutrition, Vol. 1 Academic Press, New York. 69-93.

- Lee, D.S., Hagggar P.E., Lee J. and Yam K.L. (1991). Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. *Journal of Food Science* 56: 1580-1585.
- Lee, D.S., Hagggar P.E., Lee J. and Yam K.L. (1991). Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. *Journal of Food Science* 56: 1580-1585.
- Lehninger, A.L., (1998). *Bioquímica*. Barcelona. Ediciones Omega. 427-448.
- Minolta. 1994. *Precise color communication*. Minolta Corporation Instrument System Division, Ramsey, NJ, USA. 79 p.
- Makino Y., Iwasaki K. and Hirata T. (1996). Oxygen consumptions model for fresh produce on the basis of adsorption theory. *Transactions of the ASAE*. 39(3):1067-1073.
- Mondragon, J.C. and G. S. Perez. 1994. Reyna (Syn Alfajayucan) is the leading cactus pear cultivar central México. *Fruit. Var. J.* 48: 134-136.
- Nerd, A. and Y. Mizrahi. 1999. The effect of ripening stage on fruit quality after storage of yellow pitaya. *Postharvest Biol. Technol.* 15: 99-105.
- Peppelmbos H.W. and Van't Leven J. (1996). Evaluation of four types of inhibition for modeling the influence of carbon dioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 7:49-52.
- Pesis, E. (2005). The role of the anaerobic metabolites, acetaldehyde and ethanol in fruit ripening, enhancement of fruit quality and fruit deterioration. *Postharvest Biology and Technology* 37:1-19.

- Piga, A. (2004) Cactus pear. A fruit of nutraceutical and functional importance. Journal of the Professional Association for Cactus Development. 3(2):9-22.
- Piga, A. , D'Aquino, S. Agabbio, M., Emonti, G. and Farris, G. A. (2000). Influence of storage temperature on shelf life of minimally processed cactus pear fruits. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie. 36(2): 257-262.
- Pimienta, B., E. (1990). El nopal tunero. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco. México.
- Pimienta, B., E.E. Engleman and P. Rosas. 1985. Desarrollo de la pulpa y proporción en volúmenes de los componentes de los lóbulos de la tuna. Agrociencia 62: 51-56.
- Rai, R.D. and Shashi P. (2007). Transient state in-pack respiration rates of mushroom under modified atmosphere packaging based on enzyme kinetics. Biosystems Engineering 98:319-326.
- Rodríguez-Felix, A. Rivera-Domínguez M. y González-Aguilar G.A. (2005). Uso de atmósferas modificadas y controladas. En González-Aguilar G.A. (ed.). Nuevas tecnologías de conservación de productos vegetales frescos cortados. México: CIAD-CYTED-CONACYT-COFUPRO. pp. 447-471.
- Saenz, H. C. Sepúlveda , E., Arraya E. and Calvo, C. (1993), Colour changes in concentrated juices of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) during storage at different temperatures. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie. 26 (5):417-421.

- Salvador, M. L., Jaime P. and Oria R. (2002). Modeling of O₂ y CO₂ exchange dynamics in modified atmosphere packaging of Burlat cherries. *Journal of Food Science* 67:231-235.
- SAS Institute Inc. (1989). SAS/STAT® User's Guide. Versión 6, Cary, NC:SAS Institute Inc., pp. 209-243.
- Sepúlveda, E. and H. C. Saenz. 1990. Características físicas y químicas de pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*). *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.* 30(4): 551-555.
- Smith, S., Geeson, J. and Stow, j. (1987). Production of modified atmospheres in deciduous fruits by the use of films and coatings. *HortScience*. 22 (5):772-776.
- Svetlana F., V. Rodov, J. Peretz, and S. Ben-Yehoshua. (1995) Model for gas Exchange Dynamics in Modified Atmosphere Packages of fruits and vegetables. *Journal of food science* 60 (5):1078-1083.
- Taiz, L. and E. Zeiger. (1998). *Plant Physiology*. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., Publishers. 792 p.
- Tano, K., Oulé K.M., Doyon G. and Castaigne F. (1999). Atmospheric composition and quality of fresh mushrooms in modified atmosphere packages as affected by storage temperature abuse. *Journal of Food Science* 64 (6):1073-1077.
- Toivonen Peter, M.A. and Brummell, D.A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables: a review. *Postharvest Biology and Technology*. 48 (1):1-14.

- Tucker, G.A. (1993) Introduction. *In: Biochemistry of fruit Ripening*. Seymour G., Taylor J.E. and Tucker G. (eds). Chapman & Hall, London. Pp:1-51.
- Valle-Guadarrama S., Saucedo-Veloz C., Peña-Valdivia C.B., Corrales-García J.J.E., Chávez-Franco S.H. and Espinosa-Solares T. (2002). Skin permeance and internal gas composition in "Hass" avocado (*Persea americana* Mill.) fruits. *Food Science and Technology International* 119:556-562.
- Valle-Guadarrama, S., Gómez-Cruz, A., Cruz, F. y Chan, A. (2008). Modelado de un sistema de atmósfera modificada para la conservación de productos hortofrutícolas. II congreso internacional de matemáticas y sus aplicaciones. UACH.
- Valle-Guadarrama, S., Saucedo-Veloz C., Peña-Valdivia C.B., Corrales-García J.J.E and Chávez Franco. S.H. (2004). Aerobic-anaerobic metabolic transition in 'Hass' avocado fruits. *Food Science and Technology International*. 10(6):391-398.
- Valle-Guadarrama, S., T. Espinosa-Solares, C. Saucedo-Veloz, and C. B. Peña-Valdivia C.B. 2005. Exigen diffusivity in avocado fruit tissue. *Biosys Eng.* 92(2): 197-206.
- Vant, T. L., N. Ngu, D. N. Duy and H.H. Thanh. 2002. Dragon fruit quality and storage life: effect of harvesting time, use of plant growth