

**Universidad Autónoma de Sinaloa**  
Colegio en Ciencias Agropecuarias  
**Doctorado en Ciencias Agropecuarias**



**TESIS:**

MODELADO MATEMÁTICO DE LA VELOCIDAD DE  
RESPIRACIÓN DE AGUACATE (*Persea americana* Mill.)  
ALMACENADO EN UN EMPAQUE CON ATMÓSFERA  
MODIFICADA

**Que para obtener el grado de  
Doctora en Ciencias Agropecuarias**

**PRESENTA:**

**MC YESSICA VIRIDIANA VÁZQUEZ LÓPEZ**

**DIRECTORES DE TESIS:**

**DRA. SOILA MARIBEL GAXIOLA CAMACHO**

**DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES**

**CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO; A DICIEMBRE DE 2019**

**Universidad Autónoma de Sinaloa**  
**Colegio en Ciencias Agropecuarias**  
**Doctorado en Ciencias Agropecuarias**



**TESIS:**

MODELADO MATEMÁTICO DE LA VELOCIDAD DE  
RESPIRACIÓN DE AGUACATE (*Persea americana* Mill.)  
ALMACENADO EN UN EMPAQUE CON ATMÓSFERA  
MODIFICADA

**Que para obtener el grado de  
Doctora en Ciencias Agropecuarias**

**PRESENTA:**

**MC YESSICA VIRIDIANA VÁZQUEZ LÓPEZ**

**DIRECTORES DE TESIS:**

**DRA. SOILA MARIBEL GAXIOLA CAMACHO**  
**DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES**

**CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO; A DICIEMBRE DE 2019**

ESTA TESIS FUE REALIZADA POR **YESSICA VIRIDIANA VÁZQUEZ LÓPEZ**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA, Y HA SIDO APROBADA POR EL MISMO, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTORA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTORA

---

DRA. SOILA MARIBEL GAXIOLA CAMACHO

DIRECTOR

---

DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES

ASESOR

---

DR. JESÚS JOSÉ PORTILLO LOERA

ASESORA

---

DRA. ROSALINA IRIBE SALAZAR

ASESOR

---

DR. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ GAXIOLA

CULIACÁN, SINALOA, DICIEMBRE DE 2019



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**COLEGIO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA CULIACÁN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL FUERTE  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR  
FACULTAD DE AGRONOMÍA VALLE DEL CARRIZO

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa, el día 20 de enero del año 2020, la que suscribe Yessica Viridiana Vázquez López, alumna del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, con número de cuenta 3311314-9, de la Unidad Académica Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la UAS, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Soila Maribel Gaxiola Camacho y del Dr. José de Jesús Caro Corrales y cede los derechos del trabajo titulado “Modelado Matemático de la Velocidad de Respiración de Aguacate (*Persea americana* Mill.) Almacenado en un Empaque con Atmósfera Modificada”, a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, del Colegio de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa, para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales, todo esto en apego al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor. La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ATENTAMENTE

Yessica Viridiana Vázquez López



## UAS- Dirección General de Bibliotecas

### Repositorio Institucional

#### Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

## DEDICATORIA

A mi familia, quienes han creído en mí siempre, ejemplo de superación, solidaridad, humildad y esfuerzo. Agradezco a Dios por permitirme tener unos padres que me han apoyado en cada momento. Gracias por motivarnos a continuar con nuestra formación y ofrecernos lo mejor, entre otras muchas cualidades los convierte en unos excelentes padres. Soco, Janeth, Mario, Emmanuel, Iván, Hugo, Lupita, María Fernanda, Yuliana, Alexandro y Emiliano gracias por su compañía, alegría, ánimo y consejos. Sin su apoyo no habría sido esto posible, los amo mucho.

Tía Vero hasta el cielo envió esta dedicatoria, siempre estuvo orgullosa de mí. Gracias por todo su cariño y apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), nuestra máxima casa de estudios, donde adquirí mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), que promueve el avance de la investigación científica, así como la innovación, el desarrollo y la modernización tecnológica del país. Gracias por el apoyo económico proporcionado durante la realización de este proyecto.

Al posgrado en Ciencias Agropecuarias de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) por brindarme su confianza y permitirme crecer profesionalmente. Así mismo, por todo el apoyo otorgado hacia mi persona. Además, gracias al posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas (FCQB) por facilitar las instalaciones y los equipos de la unidad de laboratorios para llevar a cabo este proyecto. Gracias a todos los que contribuyeron en mi formación profesional.

Expresaré brevemente la gratitud que siento hacia todas aquellas personas que han estado presente durante esta etapa de mi vida. El desarrollo de esta tesis no lo puedo considerar como algo fácil, pero durante todo este tiempo pude disfrutar de cada momento en compañía de buenos amigos quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas; y estuvieron a mi lado apoyándome durante estos años.

Dra. Soila Maribel Gaxiola Camacho y MC Jaime Eleazar Borbolla Ibarra gracias por apoyarme en todo momento, contribuir constantemente en mi formación y brindarme la oportunidad de desarrollarme personal y académicamente en la FMVZ. Siempre estaré agradecida.

Dr. José de Jesús Caro Corrales ha sido un honor formar parte de su equipo de trabajo, estar bajo su dirección ha sobrepasado por mucho todas las expectativas. Gracias por fomentar en mí el deseo de superación en la vida, por su orientación, por el apoyo en mi labor científica y por todo lo aprendido.

Dr. Jesús José Portillo Loera, Dra. Rosalina Iribe Salazar y Dr. Miguel Ángel Rodríguez Gaxiola gracias por las asesorías brindadas en la realización de este trabajo.

Laboratorio de Mediciones Termofísicas (FCQB): Clarisa, Rogelio, Felicitas, Luis, Melissa, Guillermo y Benjamín, gracias por todos los momentos que pasé con ustedes.

Laboratorio de Análisis de Alimentos (FMVZ): Sra. Lourdes, maestra Lupita, Nubia, Jaime y Manuel, gracias por su gran apoyo y ayudarme a consolidar este logro en mi vida.

Equipo Marabunta: Sandra, Francia, Isabel, Tania, Cielo, Jesús, Orlando, José Juan, Cristian, Claudio y David, gracias por su amistad y cariño. Agradecida por formar parte de un gran equipo.

Compañeros y amigos de la FMVZ gracias por sus muestras de cariño y apoyo constantemente.

Rosalina, Claudia, César, Milton, Elton, Gabriela, Carlos, Agustín y David se han convertido en grandes amigos, gracias por tu todo su apoyo, ánimo y cariño.

Gracias a todas las personas que directa o indirectamente apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis



| <b>CONTENIDO</b>   | <b>PÁGINA</b> |
|--|---------------|
| <b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....                                       | vii           |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                                       | viii          |
| <b>RESUMEN</b> .....   | ix            |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | x             |
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....       | 1             |
| 1.1. INTRODUCCIÓN.....   | 1             |
| 1.2. REVISIÓN DE LITERATURA.....                                     | 4             |
| 1.2.1. AGUACATE.....   | 4             |
| 1.2.1.1. Generalidades.....  | 4             |
| 1.2.1.2. Composición.....  | 6             |
| 1.2.1.3. Importancia económica.....                                  | 6             |
| 1.2.1.4. Maduración.....   | 8             |
| 1.2.1.5. Índices de madurez.....                                     | 9             |
| 1.2.1.6. Manipulación del aguacate.....                              | 11            |
| 1.2.2. RESPIRACIÓN.....  | 11            |
| 1.2.2.1. Factores que afectan la respiración.....                    | 12            |
| 1.2.2.1.1. Concentraciones de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> ..... | 13            |
| 1.2.2.1.2. Temperatura.....  | 13            |
| 1.2.2.1.3. Estrés físico.....  | 14            |
| 1.2.2.1.4. Variedad.....   | 14            |
| 1.2.2.1.5. Actividad de agua (a <sub>w</sub> ) y pH.....             | 14            |
| 1.2.2.1.6. Estructura biológica.....                                 | 15            |
| 1.2.2.1.7. Producción y sensibilidad al etileno.....                 | 15            |
| 1.2.3. PRINCIPALES MÉTODOS DE CONSERVACIÓN.....                      | 16            |
| 1.2.3.1. Refrigeración.....  | 16            |

|  |    |
|--|----|
| 1.2.3.2. Atmósfera modificada.....   | 17 |
| 1.2.3.2.1. Métodos para crear una atmósfera modificada.....  | 19 |
| 1.2.3.2.2. Gases utilizados en atmósfera modificada.....   | 19 |
| 1.2.3.2.3. Tolerancia de productos a atmósfera modificada.....   | 19 |
| 1.2.3.2.4. Características y permeabilidad de la película.....   | 20 |
| 1.2.3.2.5. Polímeros para atmósfera modificada.....  | 20 |
| 1.2.3.2.6. Diseño de empaque para atmósfera modificada.....  | 21 |
| 1.2.3.3. Condiciones de almacenamiento para aguacate.....  | 24 |
| 1.2.3.4. MODELADO MATEMÁTICO DE LA VELOCIDAD DE<br>RESPIRACIÓN.....  | 24 |
| CAPÍTULO 2. ESTIMACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE UN EMPAQUE DE<br>ATMÓSFERA MODIFICADA PARA EL ALMACENAMIENTO DE AGUACATE<br>“HASS”.....          | 28 |
| 2.1 ABSTRACT.....  | 28 |
| 2.2 RESUMEN.....   | 29 |
| 2.3 INTRODUCCIÓN.....  | 30 |
| 2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....  | 32 |
| 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 39 |
| 2.6 CONCLUSIÓN.....  | 50 |
| 2.7 LITERATURA CITADA.....   | 51 |
| CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE<br>AGUACATE “HASS” ALMACENADO EN BOLSAS AG FRESH® PARA<br>ATMÓSFERA MODIFICADA..... | 53 |
| 3.1 ABSTRACT.....  | 53 |
| 3.2 RESUMEN.....   | 54 |
| 3.3 INTRODUCCIÓN.....  | 55 |
| 3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....  | 57 |
| 3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....  | 59 |
| 3.6 CONCLUSIÓN.....  | 74 |

|   |    |
|---|----|
| 3.7 LITERATURA CITADA.....              | 75 |
| CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES..... | 78 |
| CAPÍTULO 5. LITERATURA CITADA.....      | 79 |

## ÍNDICE DE CUADROS

| <b>Cuadro</b> | <b>Título</b>   | <b>Página</b> |
|---------------|---|---------------|
| 1             | Composición nutrimental de frutos de aguacate por 100 g de fruto fresco.  | 7             |
| 2             | Permeabilidad al O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> de materiales empleados en atmósfera modificada   | 23            |
| 3             | Parámetros del modelo de respiración para aguacate “Hass” a 8 ± 1 °C.   | 43            |
| 4             | pH en la maduración de aguacate “Hass” a 21 ± 1 °C durante 2, 4 y 6 días, después de almacenado por 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a 21 ± 1 °C, refrigeración a 8 ± 1 °C y atmósfera modificada a 8 ± 1 °C. | 71            |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Figura</b> | <b>Título</b>  | <b>Página</b> |
|---------------|--|---------------|
| 1             | Corte longitudinal de un fruto de aguacate   | 5             |
| 2             | Fruto brillante inmaduro fisiológicamente (a). Fruto opaco, maduro fisiológicamente (b)  | 10            |
| 3             | Velocidades de consumo de O <sub>2</sub> y producción de CO <sub>2</sub> experimentales (exp) y estimadas (est), en ausencia y presencia del inhibidor (8 %mol CO <sub>2</sub> ) para aguacate “Hass” a 8 ± 1 °C.                          | 41            |
| 4             | Cantidad total de O <sub>2</sub> difundido (Q) experimental (exp) y estimada (est) a través del empaque en función del tiempo a 8 ± 1 °C   | 45            |
| 5             | Concentraciones de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> experimentales (exp) y estimadas (est) para aguacate “Hass” dentro de un empaque para atmósfera modificada a 8 ± 1 °C.   | 48            |
| 6             | Concentraciones de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> estimadas para aguacate “Hass” dentro de un empaque para atmósfera modificada a 8 ± 1 °C utilizando las permeabilidades propuestas (prop) y estimadas (est).                           | 49            |
| 7             | Firmeza ( <i>F</i> ) de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a 21 ± 1 °C, refrigeración a 8 ± 1 °C y atmósfera modificada a 8 ± 1 °C.   | 60            |
| 8             | Firmeza ( <i>F</i> ) en la maduración de aguacate “Hass” a 21 ± 1 °C durante 2, 4 y 6 días, después de almacenado por 8, 16, 24 y 32 días en temperatura ambiente a 21 ± 1 °C, refrigeración a 8 ± 1 °C y atmósfera modificada a 8 ± 1 °C. | 60            |
| 9             | Diferencia total de color en exocarpio ( $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ ) para aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a 21 ± 1 °C, refrigeración a 8 ± 1 °C y atmósfera modificada a 8 ± 1 °C.       | 64            |

- |    |   |    |
|----|---|----|
| 10 | Diferencia total de color en exocarpio ( $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ ) en la maduración de aguacate “Hass” a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2, 4 y 6 días, almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, para los tratamientos temperatura ambiente a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , refrigeración a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ y atmósfera modificada a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ .   | 64 |
| 11 | Diferencia total de color en mesocarpio ( $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ ) de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , refrigeración a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ y en atmósfera modificada a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ .  | 67 |
| 12 | Diferencia total de color en mesocarpio ( $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ ) en la maduración de aguacate “Hass” a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2, 4 y 6 días, almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, para los tratamientos temperatura ambiente a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , refrigeración a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ y atmósfera modificada a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ . | 67 |
| 13 | pH de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , refrigeración a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ y en atmósfera modificada a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ .  | 69 |
| 14 | Sólidos solubles totales (SST) de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , refrigeración a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ y en atmósfera modificada a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ .  | 73 |
| 15 | Sólidos solubles totales (SST) en la maduración de aguacate “Hass” a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 2, 4 y 6 días, almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, para los tratamientos temperatura ambiente a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ , refrigeración a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ y atmósfera modificada a $8 \pm 1^\circ\text{C}$ .   | 73 |

## RESUMEN

La refrigeración y el empaqueo en atmósfera modificada son tecnologías útiles para conservar y extender la vida útil de las frutas y hortalizas. La industria del empaqueo tiene como objetivo desarrollar permanentemente tecnologías que brinden condiciones adecuadas para la comercialización de frutas y hortalizas. Debido a las demandas del mercado, se han desarrollado empaques para proteger los productos frescos de la pérdida de calidad y prolongar la vida útil, un empaque para atmósfera modificada no siempre se usa para productos hortícolas en México. Hay pocos casos en que los empaques están diseñados para un fruto específico. A veces, se usa el mismo empaque para diferentes frutos; por lo tanto, no hay un control adecuado de la concentración del gas durante el almacenamiento, lo que provoca un deterioro más rápido. El objetivo de esta investigación fue simular las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de aguacate “Hass” (*Persea americana* Mill.) almacenado en un empaque para atmósfera modificada con diferentes permeabilidades al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, basado en los balances de masa en estado no estacionario para las concentraciones de los gases y de la cinética enzimática para las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>. Se utilizaron bolsas TrendLife® microperforadas, espesor de 1.27 mm (50 mil) y 120 microperforaciones y bolsas (AG Fresh Liner Box) con un espesor 0.20 mm. Un sistema cerrado y modelos de inhibición se utilizaron para determinar el comportamiento respiratorio y los parámetros cinéticos correspondientes se obtuvieron mediante un análisis de regresión. La firmeza se reportó como la fuerza de compresión necesaria para penetrar el tejido. Los parámetros de color,  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se midieron en exocarpio y mesocarpio, se evaluó el pH por potenciometría y SST por refractometría. Se utilizaron cuatro diseños completamente aleatorios. Las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro de un empaque para atmósfera modificada en función del tiempo se simuló satisfactoriamente ( $R^2 > 0.97$ ) a  $8 \pm 1$  °C utilizando un modelo de inhibición competitivo. A través de la simulación, se probaron diferentes permeabilidades para asegurar niveles más bajos de O<sub>2</sub> y mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro de un empaque para atmósfera modificada. Con las permeabilidades estimadas de O<sub>2</sub> ( $2.9 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>) y CO<sub>2</sub> ( $4.1 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>), las concentraciones de los gases dentro del empaque se simuló para que el sistema alcanzara concentraciones estables de 10.0 %mol O<sub>2</sub> y 9.5 %mol CO<sub>2</sub>, después de 240 h de almacenamiento. Estas permeabilidades podrían mejorar la atmósfera interna y extender la vida útil del aguacate “Hass” cuando se almacenan en un empaque para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. La firmeza,  $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ ,  $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ , pH y SST se encontraron en un rango de 4.0 a 96.6 N, 3.8 a 25.6, 3.2 a 20.3, 6.6 a 7.1 y 5.3 a 7.7 °Brix, respectivamente. Durante el período de almacenamiento, los frutos almacenados en atmósfera modificada mostraron una firmeza,  $\Delta E_{\text{exocarpio}}$  y  $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$  similares a las del fruto fresco. El tipo de almacenamiento no mostró ningún efecto sobre el pH y el SST durante el período de almacenamiento. Un empaque AG Fresh® para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C permite prolongar la vida útil del aguacate “Hass” hasta 32 días en comparación con los frutos a temperatura ambiente (16 días), porque se reducen los cambios en la firmeza y el color.

**Palabras clave:** aguacate, atmósfera modificada, modelado, respiración

## ABSTRACT

Refrigeration and modified atmosphere packaging (MAP) are useful technologies to preserve and extend the shelf life of fruit and vegetables. The packaging industry aims to permanently develop technologies that provide suitable conditions for the commercialization of fruit and vegetables. Due to the market demands, packages have been developed to protect fresh products from quality loss and to prolong shelf life. MAP is not always used for horticultural products in Mexico. There are few cases where packages are designed for a specific fruit. Sometimes, the same package is used for different fruit; therefore, there is no adequate control of the gas concentration during storage, causing a faster deterioration. The objective of this research was to simulate the O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations of “Hass” avocado (*Persea americana* Mill.) stored in a MAP with different O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> permeabilities, based on the non-stationary state mass balances for the gas concentrations and on the enzymatic kinetics for O<sub>2</sub> consumption and CO<sub>2</sub> production rates. Microperforated TrendLife® bags elaborated from polyamides, with dimensions of 82×74 cm, thickness of 1.27 mm (50 mil), and 120 microperforations with diameter of 0.7 mm and bags for modified atmosphere packaging made from a commercial plastic film with a thickness of 0.20 mm. A closed system and inhibition models were used to determine the respiratory behavior, and the correspondent kinetic parameters were obtained through a regression analysis. The physicochemical parameters were firmness, total color difference ( $\Delta E$ ) in exocarp and mesocarp, pH, and total soluble solids (*TSS*). Firmness was reported as the compression force needed to penetrate the tissue. Color parameters,  $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$  were measured in exocarp and mesocarp, pH was evaluated by potentiometry, and *TSS* by refractometry. Four completely random designs were used. The O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations inside a MAP in function of time were satisfactorily ( $R^2 > 0.97$ ) simulated at  $8 \pm 1$  °C using a competitive inhibition model. Through simulation, different permeabilities were tested to ensure lower O<sub>2</sub> and higher CO<sub>2</sub> concentration levels inside the MAP. With the estimated O<sub>2</sub> ( $2.9 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>) and CO<sub>2</sub> ( $4.1 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>) permeabilities, the gas concentrations inside the package were simulated for the system to reach stable concentrations of 10.0 and 9.5 mol% for O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> after 240 h of storage. These permeabilities could improve the internal atmosphere and extend the “Hass” avocado shelf life when stored under MAP at  $8 \pm 1$  °C. Firmness,  $\Delta E_{\text{exocarp}}$ ,  $\Delta E_{\text{mesocarp}}$ , pH, and *TSS* were found in a range from 4.0 to 96.6 N, 3.8 to 25.6, 3.2 to 20.3, 6.6 to 7.1, and 5.3 to 7.7 °Brix, respectively. During the storage period, fruit stored in modified atmosphere showed a firmness,  $\Delta E_{\text{exocarp}}$ , and  $\Delta E_{\text{mesocarp}}$  similar to those of fresh fruit. Type of storage showed no effect on pH and *TSS* during the storage period. An AG Fresh® package for modified atmosphere at  $8 \pm 1$  °C allows to prolong the shelf life of “Hass” avocado up to 32 days compared to fruit at room temperature (16 days), because changes in firmness and color are reduced.

Keywords: avocado, modified atmosphere, modeling, respiration



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LITERATURA

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es una especie de gran importancia socioeconómica en México. Se estima una producción total de 5.92 millones de toneladas, con México como el principal productor (2.02 millones de toneladas) y exportador (926,597 toneladas) de aguacate (FAOSTAT, 2018). La comercialización y consumo del aguacate es principalmente en fresco, por lo tanto, es importante realizar prácticas que ayuden a mantener la calidad una vez cosechado. La refrigeración y la atmósfera modificada en frutas y hortalizas se emplean con el fin de extender su vida útil. La refrigeración es una de las tecnologías más ampliamente utilizada para conservar el fruto de aguacate (Pérez *et al.*, 2004). El fruto se envasa en cajas de cartón con una capacidad de 4 kg y está diseñada para mantener la humedad y ventilación adecuada durante la refrigeración. La respiración es un proceso fundamental en la conversión de energía, que todos los seres vivos tienen en común (Millar *et al.*, 2011). Además, debido a su importancia fisiológica, el conocimiento de los parámetros respiratorios tiene relevancia tecnológica; particularmente hacia el desarrollo de empaques para atmósfera modificada (Gomes *et al.*, 2010). Esta tecnología consiste en modificar las concentraciones de gas que rodean un producto para que sean diferentes de las del aire. Está implicada una reducción de O<sub>2</sub> y un aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, cambiando los procesos fisiológicos relacionados con la maduración y la senescencia, y prolongando la conservación del producto (Kader y Saltveit, 2003). Se ofrecen empaques para atmósfera modificada para productos hortícolas para prolongar la calidad de los productos frescos. Sin embargo, no siempre se utilizan; a veces, se usan en forma genérica para varios frutos,

y hay pocos empaques para un fruto específico; estos, en algunos casos, no cumplen con los requisitos para generar la atmósfera óptima, maximizar la conservación y mantener la calidad del fruto. Un empaque para atmósfera modificada mal diseñado podría ser ineficaz para extender la vida útil de los productos envasados, si no se establece la atmósfera óptima dentro del paquete (Oliveira *et al.*, 2012). Debido a esto, puede causar una reducción excesiva de  $O_2$  o una alta concentración de  $CO_2$ , con el riesgo de respiración anaeróbica o daño por  $CO_2$  (Rojas-Graü *et al.*, 2009). El diseño de películas comerciales específicas para cada fruto puede reducir estos riesgos. En México, para la exportación de aguacate, un empaque para atmósfera modificada con permeabilidad óptima no se usa con frecuencia y un incentivo podría ser diseñar empaques adecuados que permitan extender la vida útil de este fruto. En los últimos años, el modelado matemático se ha empleado como una herramienta conveniente para el diseño de un empaque para atmósfera modificada, lo que permite estimar la permeabilidad óptima de la película para mantener la calidad de los alimentos (Rennie y Tavoularis, 2009). Básicamente, estos modelos utilizan los principios del balance de masas para describir las interacciones entre la velocidad de respiración y la permeabilidad de la película con la atmósfera que rodea el producto (Mangaraj y Goswami, 2011). Lee *et al.* (1991) describieron la dependencia de la frecuencia respiratoria en  $O_2$  utilizando un modelo cinético de Michaelis-Menten; desde entonces, se ha utilizado con éxito para modelar el comportamiento respiratorio de frutas y hortalizas. El efecto inhibitorio del  $CO_2$  en la respiración puede considerarse utilizando los modelos de inhibición competitiva, acompetitiva, no competitiva y mixta (Geysen *et al.*, 2005). Existen pocas investigaciones para modelar la velocidad de respiración de los frutos de aguacate “Hass” almacenados en un empaque para atmósfera

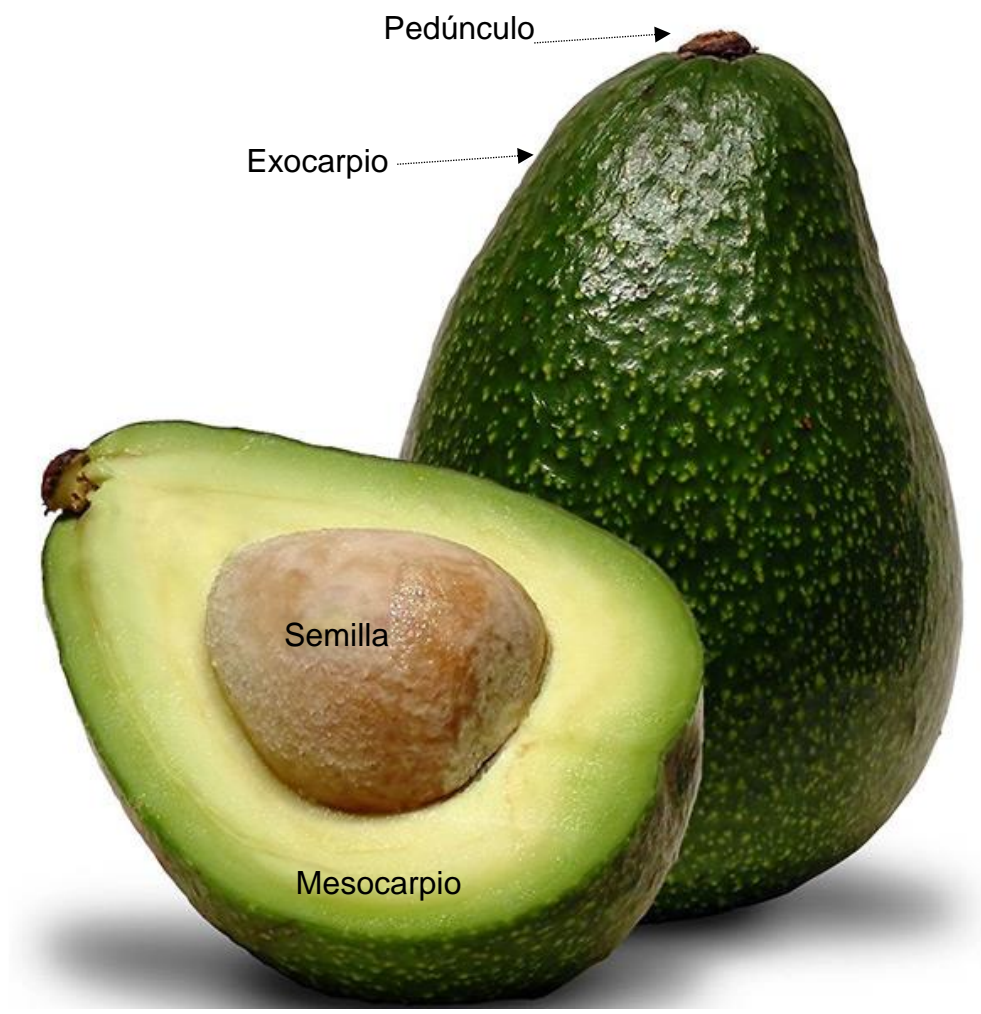
modificada. Xiao y Kiyota, (2000) utilizaron modelos matemáticos para predecir la presión parcial de O<sub>2</sub> en estado estable para diseñar un empaque para atmósfera modificada para aguacate "Fuerte". Castellanos *et al.* (2017) informaron que un modelo basado en cinética enzimática con inhibición no competitiva describió adecuadamente el proceso de respiración en los frutos de aguacate "Hass". Sin embargo, existe la necesidad de determinar la permeabilidad óptima del gas para disminuir el O<sub>2</sub> y aumentar las concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro del empaque, para reducir la velocidad de respiración del aguacate y estabilizar la atmósfera interna durante el almacenamiento. Por otro lado, existen reportes de aguacate variedad "Hass", donde se estudia el efecto de diferentes métodos de conservación (refrigeración, atmósfera modificada o ambos) sobre parámetros de calidad en aguacate "Hass", son los siguientes: Baskaran *et al.*, 2002; Maarten *et al.*, 2003; Dixon *et al.*, 2004; Pérez *et al.*, 2004; Russo *et al.* 2006; Espinosa-Cruz *et al.*, 2014. González *et al.* (1990) almacenaron aguacate "Hass" a 5 °C en películas plásticas de polietileno de baja y alta densidad durante cuatro semanas. Meir *et al.* (1997) almacenaron frutos de aguacate "Hass" a 5 °C en bolsas de polietileno de 30 µm de espesor durante nueve semanas. Ahmed *et al.* (2007) reportaron el almacenamiento en atmósfera modificada de frutos de aguacate "Hass" (5 y 7 semanas) y "Fuerte" (8 y 9 semanas) a 5 °C. En este sentido el objetivo de la presente investigación fue predecir las concentraciones de O<sub>2</sub> y de CO<sub>2</sub> de aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. "Hass", empacado en atmósfera modificada, mediante la aplicación de balances de masa en estado no estacionario para las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y de ecuaciones para la velocidad de consumo de O<sub>2</sub> y de producción de CO<sub>2</sub>.

## 1.2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 1.2.1. AGUACATE

#### 1.2.1.1. Generalidades

El aguacate pertenece al reino Plantae, familia de Lauraceae, orden Laurales, género *Persea* y especie *P. americana* Mill. (Zafar y Sidhu, 2018). El aguacate (*Persea americana* Mill.) es el único representante de importancia económica entre los frutos comestibles de la familia Lauraceae, la cual comprende alrededor de 2 200 especies (Pérez-Álvarez, 2015). El aguacate es originario del centro y este de México, y Guatemala (Williams, 1977), de donde se ha distribuido al resto del mundo (Barrientos y López, 2002). Las variedades comerciales de aguacate son híbridos de diferentes razas. Los más importantes cultivares de climas subtropicales, como el “Hass”, “Bacon” y “Fuerte”, son producto de las cruces entre las razas Mexicana y Guatemalteca (Newett *et al.*, 2002). El árbol de aguacate en promedio puede alcanzar una altura de hasta 20 metros; sin embargo, cuando se cultiva en plantaciones comerciales, no se deja crecer más de 5 m, para facilitar el control fitosanitario y cosecha. Esta especie vegetal es de tronco grueso y con hojas alargadas, con varias ramificaciones que generan un follaje denso. Se considera un cultivo perenne debido a que se cultiva durante todo el año (SAGARPA, 2011). El fruto de aguacate es una drupa, la morfología del pericarpio está compuesta por un exocarpio, mesocarpio y endocarpio, cada uno con características específicas (**Figura 1**) (Esteban-Zapata *et al.*, 2014). El fruto tiene forma de pera, de color verde claro a negro, cáscara rugosa con una pulpa verde amarillenta y un hueso central muy grande. Existen aproximadamente unas 400 variedades, por lo que podemos encontrar frutos de formas y masas diferentes, que pueden llegar a ser de 150 a 350 g (Rodríguez y Sánchez, 2005). Más allá de su uso comestible en fresco y procesado tiene amplias aplicaciones como materia prima para la extracción de aceite y en la industria cosmética. En los últimos años se ha desarrollado su industrialización en la producción de alimentos, extracción de aceites y productos farmacológicos (Kritchevsky *et al.*, 2003; Ortiz *et al.*, 2004).



**Figura 1.** Corte longitudinal de un fruto de aguacate.

#### 1.2.1.2. Composición

El consumo de aguacate tiene beneficios importantes para la salud debido a su considerable contenido nutrimental (Naveh *et al.*, 2002). La composición del fruto de aguacate depende principalmente del cultivar y la etapa de maduración (Vekiari *et al.*, 2004). En el **Cuadro 1** se presenta la composición de aguacate por 100 g de fruto fresco. El aceite de aguacate es principalmente insaturado, y consiste en ácidos grasos monoinsaturados (ácido oleico) y poliinsaturados (ácido linoleico y linolénico) (Maldonado-Torres *et al.*, 2007). Además de la grasa, otros nutrientes presente en el fruto de aguacate son proteína, azúcares (presente en cantidades insignificantes), pigmentos, taninos, antioxidantes y fibra (Naveh *et al.*, 2002).

#### 1.2.1.3. Importancia económica

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es el cuarto fruto tropical más importante en el mundo. Es de gran importancia socioeconómica en México, en el 2018 se estimó una producción de 5.92 millones de toneladas. México fue el principal productor (2,029,886 t), que representa el 34.3 % de la producción mundial, seguido por Indonesia (263,000 t) y Republica Dominicana (214,000 t). La variedad Hass es comercialmente el cultivar más importante representa alrededor del 95 % de la cosecha total. Por otra parte, entre los principales países exportadores de aguacate se encuentran México (926,597 t), Chile y Países Bajos (FAOSTAT, 2018). El estado de Michoacán es el principal productor de aguacate en México con un total de 166 000 ha cultivadas en 2018, aunque esta área ha aumentado anualmente (SIAP, 2019). El fruto es comercializado en 21 mercados, entre los que destacan por su valor económico: Estados Unidos, Japón, Canadá, Francia, España, China, Países Bajos, Hong Kong, Reino Unido, Alemania, Singapur, Bélgica entre otros (BANCOMEXT, 2014). Por otro lado, México es el principal consumidor de aguacate en el mundo. El consumo anual per cápita en México es aproximadamente de 9 kg, mientras que el consumo promedio mundial es de 3-5 kg (FAOSTAT, 2018).

**Cuadro 1.** Composición nutrimental de frutos de aguacate por 100 g de fruto fresco.

| Nutriente                             |          |
|---------------------------------------|----------|
| <b>Proximal</b>                       |          |
| Agua                                  | 73.23 g  |
| Energía                               | 160 kcal |
| Proteína                              | 2 g      |
| Lípidos totales (grasas)              | 14.66 g  |
| Ceniza                                | 1.58 g   |
| Carbohidratos, por diferencia         | 8.53 g   |
| Fibra total dietaria                  | 6.7 g    |
| Azúcares totales                      | 0.66 g   |
| <b>Minerales</b>                      |          |
| Calcio                                | 12 mg    |
| Hierro                                | 0.55 mg  |
| Magnesio                              | 29 mg    |
| Fósforo                               | 52 mg    |
| Potasio                               | 485 mg   |
| Sodio                                 | 7 mg     |
| Zinc                                  | 0.64 mg  |
| Cobre                                 | 0.19 mg  |
| Manganeso                             | 0.142 mg |
| <b>Vitaminas</b>                      |          |
| Vitamina C<br>(Ácido ascórbico total) | 10 mg    |
| Tiamina                               | 0.067 mg |
| Riboflavina                           | 0.13 mg  |
| Niacina                               | 1.738 mg |
| Ácido pantoténico                     | 1.389 mg |
| Vitamina B6                           | 0.257 mg |
| Folatos totales                       | 81 µg    |
| β-carotenos                           | 62 µg    |
| α-carotenos                           | 24 µg    |
| β-criptoxantina                       | 28 µg    |
| Vitamina A, IU                        | 146 IU   |
| Vitamina E (α-tocoferol)              | 2.07 mg  |
| Vitamina K (Filoquinona)              | 21 µg    |
| Zafar y Sidhu (2018)                  |          |

#### 1.2.1.4. Maduración

La maduración de los frutos es una secuencia de reacciones bioquímicas (Bleecker y Kende, 2000). Es un proceso complejo, cambios en color, textura, sabor y aroma de la pulpa (Alexander y Grierson, 2002). Esta comienza al finalizar el crecimiento del fruto y finaliza en la senescencia. En los frutos existen dos estadios de maduración, es decir, la madurez fisiológica y de consumo. La calidad del fruto comienza desde la cosecha, con la madurez fisiológica (Zauberman y Schiffmann-Nadel, 1977). El signo más visible de la maduración en muchos frutos es el desarrollo del color, que está determinado principalmente por la pérdida de clorofilas y la acumulación de pigmentos coloreados (Gross, 2002). Durante la maduración, las paredes celulares del fruto sufren grandes modificaciones que los hacen más suaves. Aunque la composición de la pared celular de los tejidos del fruto varía entre las especies y el desarrollo, en general, las paredes celulares se pueden definir como una mezcla de microfibrillas de celulosa rígida incrustadas en una fase de matriz tipo gel hidratada que contiene polisacáridos no celulósicos: hemicelulosas, pectinas, glucoproteínas y lignina (Johnson *et al.*, 2017). Mientras avanza la maduración, la pared celular y la lámina media sufren la despolimerización de los glicanos de la matriz, la solubilización y la despolimerización de las pectinas y la pérdida de azúcares neutros de la cadena lateral de la pectina. Estas modificaciones resultan de la actividad de enzimas como la poligalacturonasa (PG), la pectina metilesterasa (PME) y la celulasa.

Un aguacate fisiológicamente maduro es aquel que ha alcanzado un estadio particular de desarrollo en el cual si es cosechado, madurará a una condición comestible con un sabor aceptable y una textura identificable de la variedad específica. Contrariamente, un fruto inmaduro fisiológicamente es el que no ha alcanzado ese estadio particular de desarrollo y, aunque se ablandará, no tendrá una calidad comestible aceptable (Barmore, 1977). La madurez de consumo hace referencia al punto de la maduración en el cual el fruto ha desarrollado las características de color, sabor y aroma que el consumidor desea. La madurez del fruto está basada en el metabolismo de lípidos, con una rápida acumulación de aceite y de materia seca (Davenport y Ellis, 1959).



El proceso de maduración del aguacate está marcado por una variedad de cambios bioquímicos que incluyen incrementos en la producción de etileno y en la respiración, ablandamiento y desarrollo de componentes de sabor (Seymour y Tucker, 1993). A diferencia de la mayoría de frutales, el aguacate no alcanza la madurez de consumo en el árbol, sino después de que se cosecha (Schroeder, 1953). Una de las posibles explicaciones para este fenómeno, es que mientras el fruto se encuentre en el árbol, esta será beneficiada por factores que inhiben la maduración (Burg y Burg, 1962). Otra posible explicación la dan Grumet *et al.* (1961) y Dopico *et al.* (1991).

#### 1.2.1.5. Índices de madurez

Los índices de madurez son indicadores del momento en el cual el fruto ha alcanzado la madurez fisiológica y por lo tanto puede cosecharse. El color del exocarpio (cáscara) es el índice más utilizado. A medida que el fruto se madura va generando una decoloración parcial (degradación de clorofila), por lo que el color verde brillante se va perdiendo paulatinamente y el fruto comienza a verse más opaco (**Figura 2**). El método de determinación de la madurez por cambio de color no es confiable, ya que muchas veces un fruto puede tener un lado opaco y otro brillante, y el operario no es capaz de notarlo. También es un método subjetivo, ya que lo que para una persona es opaco, para otra puede no serlo, por lo que necesita de experiencia y destreza visual (Esteban-Zapata *et al.*, 2014).

El contenido de aceite refleja condiciones de crecimiento durante los diferentes estados de desarrollo del fruto (Bean, 1956), el método utilizado para su análisis, está basado en la extracción con éter de petróleo. Este método implica mayores costos, es lento y está fuera del alcance de los productores pues se requiere de equipos, laboratorios y mano de obra especializada (Lee, 1981).

Comercialmente la madurez fisiológica del aguacate se mide por el contenido de materia seca o por determinación del contenido de aceite, los cuales están altamente correlacionados (Lee *et al.*, 1983). Determinar el porcentaje de materia seca constituye una alternativa rápida, sencilla y económica para determinar la maduración (Ranney *et al.*, 1992).



**Figura 2.** Fruto brillante inmaduro fisiológicamente **(a)**. Fruto opaco, maduro fisiológicamente **(b)**. (Esteban-Zapata *et al.*, 2014)

#### 1.2.1.6. Manipulación del aguacate

Los aguacates se recolectan a mano con tijeras y podadoras especiales. Después, en la empacadora se preenfrian para eliminar el calor en el fruto para garantizar la calidad. Los aguacates se lavan y se clasifican para el suministro al supermercado para consumo en fresco y otros se usan para procesar. Los aguacates empacados se mantienen a una temperatura óptima para garantizar la madurez y la calidad. Todos estos pasos, desde la selección hasta la clasificación, toman de 5 a 9 días (Feng *et al.*, 2000). Es importante clasificar los aguacates por diferentes etapas de maduración y emplear medidas poscosecha para prolongar la vida útil y la calidad (Mizrach *et al.*, 1991).

#### 1.2.2. RESPIRACIÓN

Las frutas y hortalizas recién cortadas continúan respirando incluso después de la cosecha y obtienen energía principalmente a través del proceso de respiración. La respiración es generalmente un buen indicador del comportamiento respiratorio de frutas y hortalizas cosechadas, por lo que su control puede ser un medio eficaz para regular el metabolismo general y extender la vida de almacenamiento poscosecha de estos productos (Mathooco, 1996).

La mayoría de los cambios físicos y químicos que tienen lugar en frutas y hortalizas después de ser recolectados están relacionados con el metabolismo oxidativo, incluida la respiración. Todos los organismos vivos requieren un aporte continuo de energía necesaria para llevar a cabo todas las reacciones metabólicas y mantener la organización celular. La respiración es responsable de la producción de energía y la síntesis de muchos precursores bioquímicos esenciales para el crecimiento y mantenimiento de las células vivas (Del Valle y Palma, 2002). La respiración es esencialmente la oxidación enzimática de una amplia variedad de compuestos. El sustrato más importante es la glucosa, y su oxidación global se puede describir como (Yahia, 2009):



La energía química liberada durante este proceso es finalmente capturada en forma de trifosfato de adenosina (ATP), la que puede utilizarse para muchos procesos que requieren energía.

Los frutos normalmente se clasifican teniendo en cuenta su capacidad de presentar un aumento en la producción de etileno y velocidad de respiración al comienzo de la maduración. Los frutos que presentan este comportamiento se denominan climatéricos, mientras los frutos que no producen niveles elevados de etileno se conocen como no climatéricos (Barry y Giovannoni, 2007). Los frutos climatéricos se caracterizan por un aumento en la velocidad de respiración y producción de etileno en las primeras etapas de maduración. Este comportamiento climatérico está invariablemente asociado con un control autocatalítico de la producción de etileno. Dentro de esta categoría se encuentran el plátano, la manzana, la pera, el tomate, el aguacate, el melón, el melocotón, el kiwi, entre otros. Por el contrario, los frutos no climatéricos son aquellos en los que no se produce aumento ni reducción en la velocidad de respiración y la producción de etileno durante todo el período de maduración e incluye frutos como fresas y otras bayas, cítricos, uvas y cerezas. Entonces, el aumento de la respiración parece no ser un requisito estricto para la maduración del fruto, ya que los frutos no climatéricos sufren cambios de maduración similares a los climatéricos sin la explosión de la respiración. Sin embargo, en general, las velocidades elevadas de respiración aceleran la maduración del fruto y acortan la vida poscosecha, en ambos tipos de fruto (Yahia, 2009).

#### 1.2.2.1. Factores que afectan la respiración

Los factores que afectan la respiración se clasifican en términos generales como factores externos y factores internos. La respiración se ve afectada por una amplia gama de factores ambientales que incluyen luz, estrés químico, temperatura, composición atmosférica, estrés físico, estrés hídrico, reguladores del crecimiento y ataque de patógenos. Los factores internos que afectan la velocidad de respiración son la composición genética, el tipo y la etapa de madurez del producto. Los factores más importantes que afectan la respiración son la temperatura, la composición atmosférica, el estrés físico y las etapas de desarrollo (Irtwange, 2006).

#### 1.2.2.1. Concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>

La respiración se inhibe al disminuir la disponibilidad de O<sub>2</sub> dentro de las mitocondrias donde tiene lugar la etapa de oxidación (Fonseca *et al.*, 2002). Sin embargo, si la concentración de O<sub>2</sub> se vuelve demasiado baja, el metabolismo respiratorio puede ser completamente inhibido y la fermentación tendrá lugar (Yahia, 2009). Un proceso fermentativo, es mucho menos eficiente como productor de energía y sus productos son etanol y CO<sub>2</sub>. La intensidad respiratoria de un producto es un buen indicador de la actividad metabólica de los tejidos y por tanto de su vida poscosecha y de su potencial de almacenamiento. Así, una intensidad respiratoria o una producción de calor elevada significan, por lo general, una breve vida y un corto tiempo de conservación (Brecht, 1994).

La influencia del CO<sub>2</sub> en la velocidad de respiración no es tan clara, ya que depende de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, el tiempo de exposición, tipo y etapa de desarrollo del producto (Fonseca *et al.*, 2002). Al final, los niveles *in situ* de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> son el resultado combinado de la actividad metabólica del producto, los niveles atmosféricos aplicados y las características de difusión del tejido.

#### 1.2.2.2. Temperatura

La temperatura se reconoce generalmente como el factor externo más importante que influye en la respiración. Esto se debe a que la temperatura tiene un profundo efecto en las velocidades de reacciones biológicas, por ejemplo, el metabolismo y la respiración (Saltveit, 2005). Las reacciones biológicas generalmente aumentan dos o tres veces por cada aumento de 10 °C. La velocidad de respiración suele ser máxima a temperaturas moderadas entre 20 y 30 °C, pero disminuye considerablemente hasta alrededor de 0 °C, dependiendo del género, especie y cultivar. Si la temperatura alcanza los niveles de daño por frío, se puede observar un aumento en la velocidad de respiración (Fidler y North, 1967).

### 1.2.2.3. Estrés físico

El daño físico leve puede causar un aumento sustancial en la respiración. La señal producida por el estrés físico migra desde el sitio de la lesión e induce una amplia gama de cambios fisiológicos en el tejido adyacente no dañado. Algunos de los cambios más importantes incluyen respiración, producción de etileno y cicatrización de heridas. La respiración inducida por heridas a menudo es transitoria y dura unas pocas horas. Sin embargo, en algunos tejidos las heridas estimulan cambios en el desarrollo para promover la maduración, que resulta en un aumento prolongado de la respiración. El etileno estimula la respiración e induce muchos efectos fisiológicos y efectos perjudiciales inducidos en productos además de estimular la respiración (Martínez-Romero *et al.*, 2007).

### 1.2.2.4. Variedad

La especie, la variedad y el tamaño de los frutos son factores que tienen una influencia sobre la velocidad de respiración de frutas y hortalizas. (Brody, 2003). Después de la cosecha, la velocidad de respiración generalmente disminuye; lentamente en frutos no climatéricos, rápidamente en tejidos vegetativos y frutos inmaduros (Fernández-Trujillo *et al.*, 2008). Esto significa que los productos cosechados durante el crecimiento activo, como muchas hortalizas y frutas inmaduras, tienen altas velocidades de respiración. Las frutas maduras tienen velocidades relativamente bajas.

### 1.2.2.5. Actividad de agua ( $a_w$ ) y pH

Los hongos y las bacterias son las dos principales fuentes de infección que pueden ocurrir durante el cultivo y la manipulación de los productos después de la cosecha (Hotchkiss, 1989; Saltveit, 2005; Rediers *et al.*, 2009).

La actividad de agua, indica la disponibilidad de agua de un medio determinado para las reacciones químicas, bioquímicas y para la transferencia a través de membranas semipermeables. En alimentos con actividad de agua baja (0.61-0.85) las alteraciones microbianas más frecuentes son producidas por hongos. Las frutas y hortalizas son alimentos de elevada humedad que tienen valores de  $a_w$  entre 0.97 y 1, con esta  $a_w$  los organismos responsables de la descomposición y la contaminación pueden crecer

rápidamente (Allende *et al.*, 2004). Cada microorganismo tiene un pH mínimo, óptimo y máximo de crecimiento. El pH de los alimentos depende no solo de la cantidad de sustancias ácidas y básicas que contengan, sino también de la capacidad amortiguadora del producto, que generalmente está asociada a la concentración de proteínas, por esta razón, en las frutas y hortalizas la adición de sustancias ácidas, de origen fermentativo, produce variaciones importantes de pH, debido a su baja capacidad amortiguadora (Artés *et al.*, 2000). Por lo que, el pH de las frutas y hortalizas podría influir sobre los tipos de microorganismo responsables de la descomposición y contaminación durante la vida útil de un producto. Las hortalizas tienen más agua disponible, menos carbohidratos (azúcares) y un pH alto (casi neutro) que las frutas (Shakuntala Manay y Shadakshraswami, 2006). Debido a la mayor cantidad de agua disponible y al pH casi neutro, las bacterias son la microflora predominante en las hortalizas. El pH de las frutas está por debajo del nivel para apoyar el crecimiento bacteriano. Los mohos y las levaduras (hongos) son los principales microorganismos de descomposición de las frutas. La mayoría de los frutos, como limones, naranjas, piñas, melocotones y manzanas, tienen valores de pH inferiores a 4.5. Bajo estas condiciones ácidas, el *Clostridium botulinum* no puede producir su toxina (Vanalcocha, 1999).

#### 1.2.2.6. Estructura biológica

La resistencia de las frutas y hortalizas a la difusión de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etileno y vapor de agua depende de la estructura biológica de cada producto. La resistencia a la difusión de gas varía según el tipo de producto, cultivar, parte de la planta, área de superficie y etapa de madurez (Vanalcocha, 1999).

#### 1.2.2.7. Producción y sensibilidad al etileno

El etileno cumple un papel primordial en la regulación y control de los procesos metabólicos y en particular con los ligados a la maduración, hasta el extremo de que, en su ausencia, la maduración plena es imposible, por ello se le ha llamado la hormona de la maduración (Zagory y Karder, 1988).

### **1.2.3. PRINCIPALES MÉTODOS DE CONSERVACIÓN**

La calidad de frutas y hortalizas depende del manejo y selección poscosecha de las mismas, esto es, que hayan sido cosechadas con la madurez óptima, minimizar el daño por manejo, un buen manejo higiénico, mantener la humedad y temperatura óptimas (Zagory y Kader, 1988). Después de considerar la calidad de la materia prima, los métodos de conservación para frutas y hortalizas frescas más empleados se basan en la disminución de la temperatura y en la modificación de la atmósfera que rodea el producto (Kader *et al.*, 1989), estas técnicas buscan reducir la velocidad de respiración permitiendo disminuir la pérdida de agua (transpiración), el desarrollo microbiano, la senescencia y maduración, con la finalidad de mantener las propiedades sensoriales del producto.

#### **1.2.3.1. Refrigeración**

El manejo de la temperatura es la herramienta más efectiva para mantener la calidad de los frutos, debido a los efectos que genera en su fisiología (Kader y Rolle, 2004). Por lo que, este método de conservación de frutas y hortalizas consiste en la reducción de la temperatura, lo cual, permite reducir la velocidad de respiración y la actividad enzimática, disminuyendo el deterioro e incrementando su vida de almacenamiento (Phillips, 1996; DeEll y Toivonen, 1999), hasta que éstas sean removidas del almacenamiento en frío, para luego así retomar su funcionamiento fisiológico normal luego de llevarlas a temperatura ambiente, y ser capaz de madurar normalmente (Bower, 2005). Las temperaturas bajas tienen un efecto negativo en el crecimiento microbiano, que es siempre una consideración de importancia en los sistemas poscosecha (Wills *et al.*, 1999). Es de suma importancia conocer el decremento óptimo en la temperatura, debido a que éste es específico para cada fruta y hortaliza en particular, y si se sobrepasa el límite de temperatura, se puede presentar daño por frío (Blakey, 2011). Con la transpiración se pierde agua que no puede suministrarse, lo que lleva a la marchitez y deformación. Cuanto menor sea la temperatura y mayor la humedad relativa de almacenamiento, menor será la transpiración (Wills *et al.*, 1999).



### 1.2.3.2. Atmósfera modificada

El empaque en atmósfera modificada consiste en la modificación de la composición del aire (78 %N<sub>2</sub>, 21 %O<sub>2</sub>, 0.035 %CO<sub>2</sub>, vapor de agua y otros gases inertes) al que está expuesto el producto (Mahajan *et al.*, 2007), por la interacción natural entre dos procesos, es decir, la respiración de las frutas y la transferencia de los gases a través del empaque que conduce a una atmósfera con mayor y menor concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, respectivamente (Montanez *et al.*, 2010).

Esta atmósfera puede reducir potencialmente las velocidades de respiración, la producción de etileno, la descomposición y los cambios fisiológicos (Kader *et al.*, 1989), lo que permite la conservación del estado fresco del producto sin los tratamientos termoquímicos empleados generalmente en técnicas de conservación como el enlatado, congelación, deshidratación, entre otros.

En otras palabras, un empaque para atmósfera modificada consiste en lograr la concentración de equilibrio de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro del empaque, en el menor tiempo posible, debido a la interacción del producto, el empaque y la atmósfera externa (Mangaraj y Goswami, 2009).

La concentración de equilibrio de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> lograda dentro del empaque debe mantenerse constante durante todo el período de almacenamiento para continuar la velocidad de respiración y la velocidad de todo el proceso metabólico a una velocidad mínima posible para mantener la frescura y extender la vida útil de productos almacenados (Mahajan *et al.*, 2007). Si se hace coincidir la velocidad de permeación de la película para O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> con la velocidad de respiración del producto envasado se puede lograr el objetivo. Los diferentes productos varían en su comportamiento y los empaques para atmósfera modificada estarán expuestos a un entorno dinámico, cada empaque debe optimizarse para demandas específicas (Jacxsens *et al.*, 1999). Un empaque para atmósfera modificada mal diseñado puede ser ineficaz o incluso acortar la vida de almacenamiento de un producto. Si la atmósfera deseada no se establece rápidamente, el empaque no tendrá ningún beneficio; si el O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> no están dentro del rango recomendado, el producto puede experimentar serias alteraciones y su vida útil puede acortarse.

A medida que la concentración de O<sub>2</sub> dentro del empaque cae por debajo de aproximadamente 10-12 %, la respiración comienza a disminuir (Gorris y Tauscher 1999). Esta supresión de la respiración continúa hasta que el O<sub>2</sub> alcanza aproximadamente el 2-5 % para la mayoría de los productos. Si el O<sub>2</sub> disminuye (2-5 %), dependiendo del producto y la temperatura, el metabolismo fermentativo reemplaza el metabolismo aeróbico normal y se producen sabores desagradables, malos olores y volátiles indeseables (Farber, 1991).

Por otro lado, cuando la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta por encima del nivel atmosférico, se produce una supresión de la velocidad de respiración y la supresión de las actividades de microorganismos (Daniels *et al.*, 1985). La disminución de las actividades enzimáticas al proporcionar baja temperatura, bajo O<sub>2</sub> y alto CO<sub>2</sub>, en general reduce la velocidad de utilización del sustrato (es decir, carbohidratos, ácidos orgánicos y otras reservas) (Mahajan y Goswami, 2001).

Esta tecnología tiene las ventajas de que no se usan productos químicos sintéticos, sin residuos tóxicos y hay poco impacto ambiental, particularmente si las películas de plástico utilizadas pueden reciclarse. Los recientes avances en el diseño y la fabricación de películas poliméricas con una amplia gama de características de difusión de gas también han estimulado el interés en empaque en atmósfera modificada de productos frescos.

El almacenamiento en atmósfera modificada tiene una gran ventaja en los países en desarrollo porque es económica y útil cuando hay escasez de almacenamiento refrigerado. La tecnología se ha desarrollado rápidamente durante la última década (Lu, 2009). La aplicación actual de las tecnologías de atmósfera modificada incluye el almacenamiento a largo plazo de manzanas, peras, kiwis, papas, naranjas, coles y coles chinas; almacenamiento temporal o transporte de fresas, bayas, cerezas, plátanos, lichi, guayaba, champiñones, tomate, etc. (Mangaraj y Goswami, 2009). El empaque en atmósfera modificada facilita el mantenimiento de la atmósfera deseada durante todo el tiempo de manejo posterior a la cosecha entre la cosecha y el consumo (Mahajan *et al.*, 2007).

#### 1.2.3.2.1. Métodos para crear una atmósfera modificada

La atmósfera modificada dentro de los empaques de películas poliméricas se puede establecer pasivamente por el producto o intencionalmente a través de un empaque activo o una combinación de ambos (Kader *et al.*, 1989).

En el caso del empaque en atmósfera modificada activa, se establece una atmósfera con un ligero vacío y reemplazo de la atmósfera del empaque con la mezcla de gases deseada de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. La ventaja aquí es que la atmósfera de equilibrio beneficioso puede establecerse más rápidamente en el empaque que contiene el producto. Además, se pueden incluir absorbentes o adsorbentes en el empaque para eliminar O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> o C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> para controlar la concentración de estos gases (Mangaraj y Goswami, 2009).

En atmósfera modificada pasiva, la modificación de la atmósfera dentro del empaque se logra mediante la interacción natural entre dos procesos, la respiración de los productos y la transferencia de gases a través del empaque que conduce a una atmósfera más rica en CO<sub>2</sub> y más pobre en O<sub>2</sub> y depende de las características del producto y la película de empaque (Smith *et al.*, 1987).

#### 1.2.3.2.2. Gases utilizados en atmósfera modificada

Los gases comunes utilizados en atmósfera modificada son CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> es bacteriostático. El efecto inhibitor del CO<sub>2</sub> aumenta con una disminución de la temperatura. El nitrógeno es un gas inerte; no posee ningún efecto bacteriostático. Se utiliza como gas de relleno en la mezcla de gases para atmósfera modificada (Mahajan y Goswami, 2001). Los efectos beneficiosos y perjudiciales de un empaque para atmósfera modificada han sido ampliamente revisados (Sivakumar *et al.*, 2008).

#### 1.2.3.2.3. Tolerancia de productos a atmósfera modificada

El alcance de los beneficios del uso de atmósfera modificada depende del producto, la variedad, la edad fisiológica (etapa de madurez), la calidad inicial, la concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, la temperatura y la duración de la exposición a dicha condición. Someter un producto determinado a un nivel de O<sub>2</sub> por debajo o un nivel de CO<sub>2</sub> por encima de su límite de tolerancia, en una combinación de tiempo y temperatura específica,

provocará estrés en el tejido vegetal vivo, que se manifiesta como varios síntomas, como maduración irregular, iniciación o agravamiento de ciertos trastornos fisiológicos, desarrollo de sabores desagradables y mayor susceptibilidad a la descomposición y al crecimiento de hongos (Beaundry, 2000). Las frutas y hortalizas se clasifican de acuerdo con sus tolerancias relativas a  $O_2$  bajo o concentración elevada de  $CO_2$  (Watkins, 2000) cuando se mantienen en su temperatura óptima de almacenamiento y humedad relativa.

#### 1.2.3.2.4. Características y permeabilidad de la película

Los factores que determinan las características de difusión de gas de las películas son: estructura de la película, permeabilidad de la película a gases específicos, espesor, área, gradiente de concentración a través de la película, temperatura y diferencias de presión a través de la película. La humedad relativa puede afectar las características de difusión de algunas películas (Prasad, 1994). La permeabilidad es una medida de la facilidad con que un material (película) puede ser penetrado por un gas determinado o se define como la transmisión de penetrante a través de un material resistente. Los gases y el vapor pueden penetrar a través de los materiales por poros macroscópicos o microscópicos. En ausencia de grietas, picaduras u otros defectos, el mecanismo principal para el flujo de gas y vapor de agua a través de las películas es mediante un mecanismo molecular conocido como difusión activada (Mangaraj y Goswami, 2009)

#### 1.2.3.2.5. Polímeros para atmósfera modificada

Las películas poliméricas comúnmente disponibles para el envasado en atmósfera modificada de frutas y hortalizas son polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), cloruro de polivinilideno (PVDC) poliamida (Nylon) y otras películas adecuadas (Exama *et al.* 1993; Mangaraj *et al.* 2009). Aunque la industria de atmósfera modificada dispone de alternativas de materiales de embalaje cada vez mayores, la mayoría de los empaques aún se construyen a partir de seis polímeros básicos: policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), polietileno (PE), tereftalato de polietileno (PET), poliéstereno (PS)

y cloruro de polivinilideno (PVDC) (Kader *et al.*, 1989). Se informa que el LDPE y el PVC tienden a tener una alta permeabilidad al  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  y esto es importante en el sistema de empaque de atmósfera modificada para la selección de películas de empaque. Esto permite que la concentración de  $\text{O}_2$  disminuya sin una acumulación excesiva asociada de  $\text{CO}_2$  dentro del empaque (Kader *et al.*, 1989). La tecnología de fabricación de las películas poliméricas ha permitido adaptar las películas para permitir la capacidad del gas, necesaria para algunas frutas y hortalizas (Exama *et al.*, 1993). Como resultado, se han desarrollado sistemas de empaque exitosos para una variedad de productos.

Para el envasado de frutas y hortalizas en atmósfera modificada se seleccionan películas de una permeabilidad intermedia de gases. El **Cuadro 2** muestra la permeabilidad al  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  de algunas películas de empaque utilizadas para el envasado en atmósfera modificada de productos frescos (Vanalcocha, 1999).

#### 1.2.3.2.6. Diseño de empaque para atmósfera modificada

Un empaque para atmósfera modificada es un sistema dinámico durante el cual la respiración y la permeación ocurren simultáneamente. Los factores que afectan tanto la respiración como la permeación deben considerarse al diseñar un empaque (Cameron *et al.*, 1989). Se sabe que la masa de los productos mantenidos dentro del empaque, la temperatura de almacenamiento, las presiones parciales de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{C}_2\text{H}_4$  y la etapa de madurez influyen en la respiración en un empaque (Kader *et al.*, 1989). Tipo, espesor y área de superficie de la película de empaque que está expuesta a la atmósfera y a través de la cual se produce la permeación de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ , el volumen de espacio vacío presente dentro del empaque, así como la temperatura, la humedad relativa y el gradiente de las presiones parciales de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  en la película son determinantes conocidos de permeación (Renault *et al.*, 1994).

En un empaque para atmósfera modificada, los frutos frescos se envasan en empaques de película polimérica selectiva permanente. Debido a la respiración de los frutos envasados, el  $\text{O}_2$  comienza a agotarse y el  $\text{CO}_2$  comienza a acumularse dentro del empaque debido al consumo de  $\text{O}_2$  y la producción de  $\text{CO}_2$  en el proceso de respiración. En consecuencia, la respiración comienza a disminuir mientras que los

gradientes de concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  entre el empaque y la atmósfera ambiental comienzan a desarrollarse. El desarrollo de gradientes de concentración induce la entrada de  $O_2$  y la salida de  $CO_2$  a través del material de empaque, es decir, películas poliméricas. Simultáneamente, la velocidad de respiración disminuye con la disminución del nivel de  $O_2$  y el aumento del nivel de  $CO_2$ , siempre que las variaciones en los niveles de  $O_2$  y  $CO_2$  se encuentren dentro de los límites seguros.

Un empaque para atmósfera modificada correctamente diseñado, después de un período de estado transitorio (el estado en el que la concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  cambia continuamente dentro del empaque con el tiempo) se establece un estado de equilibrio. En el equilibrio, la cantidad de  $O_2$  que ingresa en el empaque y la de  $CO_2$  que sale del empaque se vuelven iguales a la cantidad de  $O_2$  consumida y de  $CO_2$  desprendida por el fruto empacado, respectivamente (Jacxsens *et al.*, 2000; Del Nobile *et al.*, 2007; Techavises y Hikida 2008). Se considera que la atmósfera del empaque está en equilibrio dinámico con la atmósfera externa. Por lo tanto, el equilibrio del empaque o estado estacionario se define como el punto en el que el consumo de  $O_2$  y producción de  $CO_2$  (velocidades de respiración) son iguales a las velocidades de permeación de los gases respectivos ( $O_2$  y  $CO_2$ ) a través de un empaque a una temperatura dada (Das, 2005; Del-Valle *et al.*, 2009). Una vez establecidas, las concentraciones de gas de equilibrio permanecen casi constantes durante todo el período estipulado de almacenamiento a menos que haya una variación considerable en las condiciones ambientales. El período desde el envasado de los frutos en el empaque hasta el establecimiento del estado estable o estado de equilibrio se llama período transitorio o tiempo de equilibrio. Los niveles de concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  de la atmósfera del empaque en los que se establece el equilibrio dinámico se denominan concentración de equilibrio de  $O_2$  y concentración de equilibrio de  $CO_2$ , respectivamente. Se sabe que un sistema de empaque ideal se equilibrará y mantendrá a los niveles de  $O_2$  y  $CO_2$  que son óptimos para el almacenamiento, el transporte y la manipulación a través de la cadena de mercado de un producto específico (Paul y Clarke, 2002).

**Cuadro 2.** Permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de materiales empleados en atmósfera modificada

| Película plástica                     | Permeabilidad al O <sub>2</sub><br>(mL cm cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> cm Hg <sup>-1</sup> ) | Permeabilidad al CO <sub>2</sub><br>(mL cm cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> cm Hg <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------------|--|---|
| Polietileno de baja densidad          | 1.98×10 <sup>-6</sup>  | 1.27× 10 <sup>-5</sup>  |
| Polietileno de alta densidad          | 3.82×10 <sup>-7</sup>  | 1.26×10 <sup>-6</sup>   |
| Polipropileno                         | 8.28×10 <sup>-7</sup>  | 3.31×10 <sup>-6</sup>   |
| Cloruro de polivinilo no plastificado | 4.32×10 <sup>-8</sup>  | 3.60×10 <sup>-7</sup>   |
| Acetato de celulosa                   | 2.81×10 <sup>-7</sup>  | 2.45×10 <sup>-6</sup>   |
| Poliestireno                          | 3.96×10 <sup>-7</sup>  | 3.17×10 <sup>-6</sup>   |
| Nylon 6                               | 1.37×10 <sup>-8</sup>  | 5.76×10 <sup>-8</sup>   |
| Tereftelato de polietileno            | 7.92×10 <sup>-9</sup>  | 5.51×10 <sup>-8</sup>   |
| Cloruro de polivinilidieno            | 1.91×10 <sup>-9</sup>  | 1.04×10 <sup>-8</sup>   |

(Robertson, 2012)

### 1.2.3.3. Condiciones de almacenamiento para aguacate

Las bajas temperaturas de almacenamiento generalmente oscilan entre 5-8 °C, pero podrían reducirse entre 2-8 °C para llegar a un mercado distante (Flitsanov *et al.*, 2000). A temperaturas entre 4 y 13 °C la vida poscosecha es de aproximadamente 2-4 semanas según el cultivar (Yahia *et al.*, 1997). Las condiciones óptimas de almacenamiento en atmósfera modificada (2-5 kPa O<sub>2</sub> y 3-10 kPa CO<sub>2</sub>) retrasan el ablandamiento y cambios en color, además, reducen la respiración y la producción de etileno del aguacate (Yahia, 1998). El aguacate verde maduro 'Hass' se puede mantener a 5-7 °C en 2 kPa de O<sub>2</sub> y 3-5 kPa de CO<sub>2</sub> durante 9 semanas, luego madura adecuadamente a temperatura ambiente a 20 °C. Se recomienda la eliminación de etileno durante el almacenamiento en atmósfera modificada. Los niveles elevados de CO<sub>2</sub> (>10 kPa) pueden aumentar la decoloración de exocarpio y mesocarpio y desarrollo de mal sabor, especialmente cuando el O<sub>2</sub> es <1 kPa (Yahia, 2009).

### 1.2.3.4. MODELADO MATEMÁTICO DE LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN

Modelos desde la década de 1960 se han utilizado para simular el proceso de respiración. Jurin y Karel (1963) desarrollaron un método gráfico para determinar las concentraciones de equilibrio de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro de un empaque permeable. Veeraju y Karel (1966) idearon un método analítico utilizando dos películas plásticas con diferentes permeabilidades para controlar las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de manera independiente. Un modelo basado en la cinética enzimática de Michaelis-Menten fue utilizado por Chevillotte (1973) para describir la respiración a nivel celular. Henig y Gilbert (1975) obtuvieron dos ecuaciones diferenciales de primer orden simultáneas de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, las resolvieron numéricamente para simular las concentraciones de gases transitorios en modelos de empaque y analizaron el efecto sobre la composición de los gases en el interior del empaque con el tiempo. Hayakawa *et al.* (1975) modificaron las ecuaciones de Henig y Gilbert (1975) y obtuvieron soluciones analíticas para los parámetros del empaque modelo. Todos los métodos mencionados requerían velocidades de respiración experimental en función de las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Yang y Chinnan (1988) utilizaron una función cuadrática con 9 parámetros para correlacionar las velocidades de respiración del tomate con las concentraciones de O<sub>2</sub>



y CO<sub>2</sub> y el tiempo de almacenamiento, y usaron otra función cuadrática con tres parámetros para correlacionar la velocidad de respiración con el tiempo de almacenamiento. Cameron *et al.* (1989) utilizaron un enfoque de prueba y error para ajustar la curva de consumo de O<sub>2</sub> de tomate, con una función de tipo exponencial con cuatro coeficientes.

Lee *et al.* (1991) desarrollaron y verificaron un modelo de respiración, basado en los principios de cinética enzimática, para predecir las velocidades de respiración de frutas y hortalizas en función de las concentraciones de O<sub>2</sub> y de CO<sub>2</sub>. Se ha utilizado desde entonces para modelar las velocidades de respiración de manzanas (Andrich *et al.*, 1991; Andrich *et al.*, 1998; Dadzie *et al.*, 1996), rodajas de manzana (Lakakul *et al.*, 1999), bananas (Maneerat *et al.*, 1997), arándanos (Cameron *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 1996; Song *et al.*, 1992), frambuesas (Joles *et al.*, 1994), espárragos y brócoli (Lee *et al.*, 1991; Peppelenbos y Leven, 1996), brócoli en trozos (Hagggar *et al.*, 1992; Lee *et al.*, 1996; Talasila *et al.*, 1994), lechuga en trozos (Smyth *et al.*, 1998), flores de caulí (Ratti *et al.*, 1996), mezcla de repollo (McLaughlin y O'Beirne, 1999), brotes de soya (Peppelenbos y Leven, 1996), hongos (Peppelenbos *et al.*, 1993) y tomates (Lee *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 1996; Peppelenbos y Leven, 1996).

Recientemente, la dependencia de la velocidad respiratoria con la concentración de O<sub>2</sub> se ha expresado ampliamente mediante una ecuación de tipo Michaelis-Menten, que es el mecanismo cinético enzimático más simple. Este modelo es una simplificación que tiende a ajustarse muy bien a los datos experimentales, y se basa en una reacción enzimática limitante en la que el sustrato es O<sub>2</sub>. Otra razón para su uso es la similitud con la respiración microbiana, por lo que esta ecuación es ampliamente utilizada. En un empaque para atmósfera modificada, la concentración máxima de O<sub>2</sub> es 21%, por lo que nunca se alcanzaría una velocidad de respiración equivalente a la velocidad máxima. De hecho, las constantes en el modelo no son parámetros reales de Michaelis-Menten, sino constantes aparentes que incorporan la influencia de todos los procesos que involucran O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (Yahia, 2009).

La inhibición competitiva ocurre cuando el inhibidor (CO<sub>2</sub>) y el sustrato compiten por el mismo sitio activo de la enzima. Por lo tanto, la velocidad de respiración máxima es

menor en altas concentraciones de CO<sub>2</sub>. La inhibición acompetitiva ocurre cuando el inhibidor reacciona con el complejo sustrato-enzima. Por lo tanto, la velocidad de respiración máxima no está muy influenciada a altas concentraciones de CO<sub>2</sub>. La inhibición no competitiva ocurre cuando el inhibidor reacciona tanto con la enzima como con el complejo enzima-sustrato. Los parámetros de la ecuación de Michaelis-Menten se pueden estimar mediante la linealización de la ecuación y el posterior análisis de regresión lineal (Andrich *et al.*, 1998).

Andrich *et al.* (1991) sugirieron que el papel del CO<sub>2</sub> en la respiración estaba mediado a través de los mecanismos de inhibición de la ecuación de Michaelis-Menten y era: competitiva, acompetitiva, no competitiva y una combinación de los tipos de inhibición competitiva y acompetitiva (Lee *et al.*, 1996; McLaughlin and O'Beirne, 1999; Renault *et al.*, 1994).

Peppelenbos y Leven (1996) estudiaron la influencia de los cuatro mecanismos de inhibición de CO<sub>2</sub> en diferentes productos utilizando datos experimentales y bibliográficos. McLaughlin y O'Beirne (1999) rechazaron el modelo no competitivo, pero los modelos de inhibición competitivos y acompetitivos dieron buenos resultados razonables, lo que sugiere que ambos tipos de inhibición ocurrieron (Fonseca *et al.*, 2002). Desde entonces, diferentes autores han aplicado con éxito la ecuación de Michaelis-Menten en diferentes frutos (Fonseca *et al.*, 2002) y extendieron la ecuación de Michaelis-Menten para describir diferentes tipos de inhibición de CO<sub>2</sub>.

Hay una serie de limitaciones para el desarrollo de modelos predictivos. Los errores experimentales potencialmente grandes y los experimentos que requieren mucho tiempo para la determinación de las velocidades de respiración para el diseño de un empaque para atmósfera modificada, así como la naturaleza compleja del proceso, son limitaciones para el desarrollo de modelos predictivos. Sin embargo, este enfoque solo puede aceptarse como un modelo simplificado, ya que, de hecho, un empaque en atmósfera modificada se basa en la capacidad de controlar la velocidad de respiración cambiando la composición atmosférica. El desarrollo de técnicas y equipos analíticos más precisos, así como la sofisticación de las herramientas informáticas para el ajuste de datos y la integración numérica, han conducido en las últimas décadas a varios estudios sobre la determinación de modelos respiratorios predictivos. Pero la atención

debe centrarse en la configuración experimental, el rango de variables y el número de puntos estudiados en ese rango, a fin de desarrollar modelos predictivos precisos. Reconociendo que modelar el proceso respiratorio con todos los factores involucrados en las reacciones enzimáticas incluidas sería muy difícil o incluso imposible, como ya se mencionó, la estrategia habitual ha sido desarrollar modelos empíricos para cada tipo de producto en función de las variables controlables, es decir, la temperatura y las concentraciones de gas. En general, los estudios sobre las velocidades de respiración se han orientado hacia el estudio de la influencia de la temperatura o al análisis de los efectos de las concentraciones de gas, pero rara vez se consideraron ambos factores simultáneamente. Un empaque que está diseñado para una temperatura de almacenamiento específica puede no estar diseñado adecuadamente para otras temperaturas debido a los diferentes efectos de la temperatura en la permeabilidad y la velocidad de respiración. Por lo tanto, la importancia de conocer la influencia de la temperatura en la velocidad respiratoria es clara (Fonseca, 2002).

## CAPÍTULO 2. ESTIMACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE UN EMPAQUE DE ATMÓSFERA MODIFICADA PARA EL ALMACENAMIENTO DE AGUACATE “HASS”

### 2.1. ABSTRACT

Refrigeration and modified atmosphere packaging (MAP) are useful technologies to preserve and extend the shelf life of fruit and vegetables. The packaging industry aims to permanently develop technologies that provide suitable conditions for the commercialization of fruit and vegetables. Due to the market demands, packages have been developed to protect fresh products from quality loss and to prolong shelf life. MAP is not always used for horticultural products in Mexico. There are few cases where packages are designed for a specific fruit. Sometimes, the same package is used for different fruit; therefore, there is no adequate control of the gas concentration during storage, causing a faster deterioration. The objective of this research was to simulate the O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations of “Hass” avocado (*Persea americana* Mill.) stored in a MAP with different O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> permeabilities, based on the non-stationary state mass balances for the gas concentrations and the enzymatic kinetics for O<sub>2</sub> consumption and CO<sub>2</sub> production rates. A closed system and inhibition models were used to determine the respiratory behavior, and the correspondent kinetic parameters were obtained through a regression analysis. The O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations inside a MAP in function of time were satisfactorily ( $R^2 > 0.97$ ) simulated at  $8 \pm 1$  °C using a competitive inhibition model. Through simulation, different permeabilities were tested to ensure lower O<sub>2</sub> and greater CO<sub>2</sub> concentrations levels inside the MAP. With the estimated O<sub>2</sub> ( $2.9 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>) and CO<sub>2</sub> ( $4.1 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>) permeabilities, the gas concentrations inside the package were simulated for the system to reach stable concentrations of 10.0 and 9.5 mol% for O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> after 240 h of storage. These permeabilities could improve the internal atmosphere and extend the “Hass” avocado shelf life when stored under MAP at  $8 \pm 1$  °C.

**Keywords:** permeability, respiration rate, MAP, avocado, *Persea americana*

## 2.2. RESUMEN

La refrigeración y el empaquetado en atmósfera modificada son tecnologías útiles para conservar y extender la vida útil de las frutas y hortalizas. La industria del empaquetado tiene como objetivo desarrollar permanentemente tecnologías que brinden condiciones adecuadas para la comercialización de frutas y hortalizas. Debido a las demandas del mercado, se han desarrollado empaques para proteger los productos frescos de la pérdida de calidad y prolongar la vida útil. Un empaque para atmósfera modificada no siempre se usa para productos hortícolas en México. Hay pocos casos en que los empaques están diseñados para un fruto específico. A veces, se usa el mismo empaque para diferentes frutos; por lo tanto, no hay un control adecuado de la concentración de gas durante el almacenamiento, lo que provoca un deterioro más rápido. El objetivo de esta investigación fue simular las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de aguacate “Hass” (*Persea americana* Mill.) almacenado en un empaque para atmósfera modificada con diferentes permeabilidades a O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, con base en los balances de masa en estado no estacionario para las concentraciones de los gases y la cinética enzimática para las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>. Un sistema cerrado y modelos de inhibición se utilizaron para determinar el comportamiento respiratorio y los parámetros cinéticos correspondientes se obtuvieron mediante un análisis de regresión. Las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro de un empaque para atmósfera modificada en función del tiempo se simularon satisfactoriamente ( $R^2 > 0.97$ ) a  $8 \pm 1$  °C utilizando un modelo de inhibición competitivo. A través de la simulación, se probaron diferentes permeabilidades para asegurar niveles más bajos de O<sub>2</sub> y mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro de un empaque para atmósfera modificada. Con las permeabilidades estimadas de O<sub>2</sub> ( $2.9 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>) y CO<sub>2</sub> ( $4.1 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>), las concentraciones de los gases dentro del empaque se simularon para que el sistema alcanzara concentraciones estables de 10.0 %mol O<sub>2</sub> y 9.5 %mol CO<sub>2</sub> después de 240 h de almacenamiento. Estas permeabilidades podrían mejorar la atmósfera interna y extender la vida útil de aguacate “Hass” cuando se almacenan en un empaque para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C.

**Palabras clave:** permeabilidad, atmósfera, respiración, aguacate, *Persea americana*

### 2.3. INTRODUCCIÓN

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es de gran importancia socioeconómica en México. La producción mundial estimada de aguacate es de 5.92 millones de toneladas y México es el principal productor (2.02 millones de toneladas) y exportador (926,597 t) de este fruto (FAOSTAT, 2018). El estado de Michoacán es el principal productor de aguacate en México con un total de 166 000 ha cultivadas en 2018, aunque esta área ha aumentado anualmente (SIAP, 2019). El consumo de este fruto es principalmente en fresco y la refrigeración es la principal tecnología utilizada para su conservación (Pérez *et al.*, 2004). El aguacate “Hass” se almacena comercialmente de 5 a 6 °C. Si el almacenamiento se lleva a cabo a una temperatura más baja, el fruto desarrolla daño por frío (Bill *et al.*, 2014). Los aguacates se empaquetan en cajas de cartón con una capacidad de 4 kg y están diseñados para mantener la humedad y la ventilación adecuadas durante la refrigeración. Se ofrecen empaques de atmósfera modificada para productos hortícolas para prolongar su calidad. Sin embargo, esta tecnología no siempre se usa y los empaques seleccionados son principalmente genéricos y se aplican para varios frutos, con solo unos pocos empaques disponibles para un fruto específico; en algunos casos, no cumplen con los requisitos para generar la atmósfera óptima, maximizar la conservación y mantener la calidad del fruto.

La respiración es un proceso fundamental en la conversión de energía, que todos los seres vivos tienen en común (Millar *et al.*, 2011). Además, debido a su importancia fisiológica, el conocimiento de los parámetros de respiración tiene relevancia tecnológica; particularmente hacia el desarrollo de un empaque para atmósfera modificada (Gomes *et al.*, 2010) como una técnica complementaria de almacenamiento en frío. Esta tecnología consiste en modificar las concentraciones de los gases que rodean el producto para que sean diferentes de las del aire. Se trata de una reducción del O<sub>2</sub> y un aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, cambiando los procesos fisiológicos relacionados con la maduración y la senescencia y prolongando la conservación del producto (Kader y Saltveit, 2003). Esta atmósfera modificada se puede crear inyectando en el empaque la mezcla de gases de la composición deseada (Lee *et al.*, 2008) o de la respiración del producto (consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>) dentro del empaque (atmósfera pasiva). La reducción de O<sub>2</sub> y el aumento de las

concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro del empaque dependen de la permeabilidad de la película. El cumplimiento de los requisitos de permeabilidad para diferentes velocidades de respiración (lenta y alta) es un desafío difícil en el diseño de un empaque para atmósfera modificada (Pandey y Goswami, 2012). Las concentraciones óptimas de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para almacenar aguacate “Hass” en un empaque para atmósfera modificada son del 2 al 5 y del 3 al 10 %mol, respectivamente (Yahia, 1998). Un empaque para atmósfera modificada mal diseñado podría ser ineficaz para extender la vida útil de los productos empacados, si no se establece la atmósfera deseada u óptima dentro del empaque (Oliveira *et al.*, 2012). Puede causar una alta concentración de CO<sub>2</sub>, con el riesgo de decoloración de la cáscara y la pulpa y el desarrollo de mal sabor en aguacate cuando la concentración de CO<sub>2</sub> es superior al 10 %, especialmente cuando la concentración de O<sub>2</sub> es inferior al 1 % (Yahia, 2012).

El diseño de películas comerciales específicas para cada fruto puede reducir estos riesgos. En México, un empaque para atmósfera modificada con una permeabilidad óptima no se usa con frecuencia para la exportación de aguacate, y un incentivo podría ser diseñar empaques adecuados que permitan extender la vida útil de este fruto. En los últimos años, el modelado matemático se ha empleado como una herramienta conveniente para el diseño de un empaque para atmósfera modificada, lo que permite estimar la permeabilidad óptima de la película para mantener la calidad de los alimentos (Rennie y Tavoularis, 2009). Básicamente, estos modelos utilizan los principios de balance de masa para describir las interacciones entre la velocidad de respiración y la permeabilidad de la película con la atmósfera que rodea el producto (Mangaraj y Goswami, 2011). Lee *et al.* (1991) describieron la velocidad de respiración dependiente del O<sub>2</sub> utilizando un modelo cinético de Michaelis-Menten; desde entonces, se ha utilizado con éxito para modelar el comportamiento respiratorio de frutas y hortalizas. El efecto inhibitorio del CO<sub>2</sub> sobre la velocidad de respiración se puede considerar mediante el uso de modelos de inhibición competitiva, acompetitiva, no competitiva y mixta (Geysen *et al.*, 2005). Existen pocos informes que modelen la velocidad de respiración de aguacate “Hass” almacenado en un empaque para atmósfera modificada. Xiao y Kiyota (2000) utilizaron modelos matemáticos para predecir la presión parcial de O<sub>2</sub> en estado estacionario para diseñar un empaque para

atmósfera modificada para aguacate "Fuerte". Castellanos *et al.* (2017) reportaron que un modelo basado en la cinética enzimática con inhibición no competitiva describió adecuadamente el proceso de respiración en el aguacate "Hass". Sin embargo, existe la necesidad de determinar la permeabilidad óptima del gas para disminuir el O<sub>2</sub> y aumentar las concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro del empaque, para reducir la velocidad de respiración de aguacate y para estabilizar la atmósfera interna durante el almacenamiento. Después de conocer la permeabilidad adecuada, se pueden obtener los requerimientos específicos (mezcla de polímeros, tamaño y número de microperforaciones) para producir un empaque para extender la vida útil del fruto. El objetivo de esta investigación fue simular las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de aguacate "Hass" (*Persea americana* Mill.) almacenado en un empaque para atmósfera modificada con diferentes permeabilidades al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, con base en los balances de masa en estado no estacionario para las concentraciones de los gases y la cinética enzimática para las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Frutos de aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. "Hass" se cosecharon en la etapa de madurez fisiológica, 35 semanas después de la floración (abril de 2017, Tacámbaro, Michoacán, México) y se compraron a un distribuidor comercial en Culiacán, Sinaloa. Los frutos se seleccionaron con base en tamaño ( $220 \pm 15$  g) y color ( $L^* = 36.5 \pm 2.7$ ,  $a^* = -13.3 \pm 2.2$ ,  $b^* = 18.1 \pm 3.5$ ). Se lavaron con una solución de hipoclorito de sodio al 1 % durante 20 min (Russo *et al.*, 2014) y se almacenaron a  $8 \pm 1$  °C. El empaque de atmósfera modificada se creó utilizando bolsas TrendLife® microperforadas elaboradas a partir de poliamidas, con dimensiones de 82x74 cm, espesor de 1.27 mm (50 mil) y 120 microperforaciones con diámetro de 0.7 mm. Los empaques se mantuvieron en una habitación de maduración de 85 a 90 % de humedad relativa humedeciendo el piso con agua.

### 2.4.1. Evaluación de la velocidad de respiración

Las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> de frutos de aguacate se midieron en un sistema cerrado de acuerdo con Iqbal *et al.* (2009). Recipientes de



vidrio de 5 L se utilizaron como cámaras de respiración con sellos de goma en la parte superior. Estos sellos tenían varillas de cobre de entrada y salida con un diámetro de 6 mm y longitudes de 24 y 8 cm, respectivamente. Mangueras de hule de látex se conectaron a las cámaras para distribuir las concentraciones de los gases. Las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se obtuvieron de tanques de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> comprimidos grado industrial (Praxair, México). Un fruto de aguacate con una masa de 220.35 ± 11.81 g se colocó en cada una de las cámaras de respiración. El sello de goma se insertó en la cámara y la muestra se aclimató con un flujo continuo de la mezcla de gases correspondiente durante 12 h a 8 ± 1 °C. El flujo de las combinaciones gaseosas se estableció a partir de válvulas de aguja genéricas macho-macho de 6 mm. Después de 12 h de aclimatación, el flujo se interrumpió y la cámara se selló herméticamente. La composición de la atmósfera se midió después de 24 h de tratamiento con un analizador de O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> (ICA 250, EUA). Las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> para cada combinación de gases se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$r_{O_2} = \frac{[O_2^i] - [O_2]}{100} \frac{V}{m(t-t_i)} \quad r_{CO_2} = \frac{[CO_2] - [CO_2^i]}{100} \frac{V}{m(t-t_i)} \quad (1)$$

donde  $r_{O_2}$  y  $r_{CO_2}$  son las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> (mL kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);  $[O_2^i]$  y  $[CO_2^i]$  son las concentraciones iniciales de los gases (%mol);  $t_i$  es el tiempo inicial (h);  $m$  es la masa (kg) y  $V$  es el volumen libre en la cámara (mL).

#### 2.4.2. Cinéticas de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>

La ecuación enzimática de Michaelis-Menten se aplicó para modelar las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> en función de la concentración de O<sub>2</sub> (Lee *et al.*, 1991) de la siguiente manera:

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}} O_2}{K_{m_{O_2}} + O_2} \quad r_{CO_2} = \frac{V_{m_{CO_2}} O_2}{K_{m_{CO_2}} + O_2} \quad (2)$$

donde  $V_{m_{O_2}}$  y  $V_{m_{CO_2}}$  son las velocidades de respiración máximas ( $\text{mL kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $K_{m_{O_2}}$  y  $K_{m_{CO_2}}$  son las constantes de afinidad ( $\% \text{mol}$ ). Por otro lado, el efecto inhibitorio del  $\text{CO}_2$  sobre la velocidad de respiración puede modelarse en función de un tipo específico de inhibición. Por lo tanto, se probaron los siguientes modelos de inhibición (Geysen *et al.*, 2005) con velocidad máxima y constante de afinidad aparentes:

#### Competitiva

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}} O_2}{K_{m_{O_2}} \alpha_{O_2}^c + O_2} \quad K_{m_{O_2,app}} = K_{m_{O_2}} \alpha_{O_2}^c \quad \alpha_{O_2}^c = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{O_2}}^c} \quad (3)$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{m_{CO_2}} O_2}{K_{m_{CO_2}} \alpha_{CO_2}^c + O_2} \quad K_{m_{CO_2,app}} = K_{m_{CO_2}} \alpha_{CO_2}^c \quad \alpha_{CO_2}^c = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{CO_2}}^c} \quad (4)$$

#### Acompetitiva

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}} O_2}{K_{m_{O_2}} + \alpha_{O_2}^u O_2} \quad V_{m_{O_2,app}} = \frac{V_{m_{O_2}}}{\alpha_{O_2}^u} \quad K_{m_{O_2,app}} = \frac{K_{m_{O_2}}}{\alpha_{O_2}^u} \quad \alpha_{O_2}^u = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{O_2}}^u} \quad (5)$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{m_{CO_2}} O_2}{K_{m_{CO_2}} + \alpha_{CO_2}^u O_2} \quad V_{m_{CO_2,app}} = \frac{V_{m_{CO_2}}}{\alpha_{CO_2}^u} \quad K_{m_{CO_2,app}} = \frac{K_{m_{CO_2}}}{\alpha_{CO_2}^u} \quad \alpha_{CO_2}^u = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{CO_2}}^u} \quad (6)$$

#### No competitiva

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}} O_2}{K_{m_{O_2}} + O_2 \alpha_{O_2}^n} \quad V_{m_{O_2,app}} = \frac{V_{m_{O_2}}}{\alpha_{O_2}^n} \quad \alpha_{O_2}^n = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{O_2}}^n} \quad (7)$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{m_{CO_2}} O_2}{K_{m_{CO_2}} + O_2 \alpha_{CO_2}^n} \quad V_{m_{CO_2,app}} = \frac{V_{m_{CO_2}}}{\alpha_{CO_2}^n} \quad \alpha_{CO_2}^n = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{CO_2}}^n} \quad (8)$$

#### Mixta

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}} O_2}{K_{m_{O_2}} \alpha_{O_2}^{m_1} + O_2 \alpha_{O_2}^{m_2}} \quad V_{m_{O_2,app}} = \frac{V_{m_{O_2}}}{\alpha_{O_2}^{m_2}} \quad K_{m_{O_2,app}} = \frac{\alpha_{O_2}^{m_1} K_{m_{O_2}}}{\alpha_{O_2}^{m_2}} \quad (9)$$

$$\alpha_{O_2}^{m_1} = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{O_2}}^{m_1}} \quad \alpha_{O_2}^{m_2} = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{O_2}}^{m_2}} \quad (10)$$

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{V_{m_{\text{CO}_2}} \text{O}_2}{K_{m_{\text{CO}_2}} \alpha_{\text{CO}_2}^{m_1} + \text{O}_2 \alpha_{\text{CO}_2}^{m_2}} \quad V_{m_{\text{CO}_2,app}} = \frac{V_{m_{\text{CO}_2}}}{\alpha_{\text{CO}_2}^{m_2}} \quad K_{m_{\text{CO}_2,app}} = \frac{\alpha_{\text{CO}_2}^{m_1} K_{m_{\text{CO}_2}}}{\alpha_{\text{CO}_2}^{m_2}} \quad (11)$$

$$\alpha_{\text{CO}_2}^{m_1} = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{\text{CO}_2}}^{m_1}} \quad \alpha_{\text{CO}_2}^{m_2} = 1 + \frac{[\text{CO}_2]}{K_{I_{\text{CO}_2}}^{m_2}} \quad (12)$$

donde  $V_{m_{\text{O}_2,app}}$  y  $V_{m_{\text{CO}_2,app}}$  son las velocidades de respiración máxima aparente ( $\text{mL kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $K_{m_{\text{O}_2,app}}$  y  $K_{m_{\text{CO}_2,app}}$  las constantes de afinidad aparente ( $\% \text{mol}$ );  $K_{I_{\text{O}_2}}^c$ ,  $K_{I_{\text{O}_2}}^u$ ,  $K_{I_{\text{O}_2}}^n$ ,  $K_{I_{\text{O}_2}}^{m_1}$ ,  $K_{I_{\text{O}_2}}^{m_2}$ ,  $K_{I_{\text{CO}_2}}^c$ ,  $K_{I_{\text{CO}_2}}^u$ ,  $K_{I_{\text{CO}_2}}^n$ ,  $K_{I_{\text{CO}_2}}^{m_1}$  y  $K_{I_{\text{CO}_2}}^{m_2}$  las constantes de disociación para el inhibidor ( $\% \text{mol}$ ). Los superíndices indican el tipo de inhibición: inhibición competitiva (c), acompetitiva (u), no competitiva (n) y mixta ( $m_1$ ,  $m_2$ ).

Las velocidades de consumo de  $\text{O}_2$  y producción de  $\text{CO}_2$  en función de las concentraciones de sustrato ( $\text{O}_2$ ) se ajustaron a la cinética de la enzima Michaelis-Menten, considerando el efecto inhibitor del  $\text{CO}_2$ .

Los gráficos de Lineweaver-Burk se construyeron para estimar los parámetros cinéticos ( $V_m$ ,  $K_m$  y  $K_i$ ) para los modelos de inhibición. Posteriormente, análisis de regresión lineal se realizaron entre el recíproco de las velocidades de respiración ( $1/r_{\text{O}_2}$  o  $1/r_{\text{CO}_2}$ ) contra el recíproco de la concentración del sustrato ( $1/[\text{O}_2]$ ) para ambos escenarios, sin considerar el efecto inhibitor del  $\text{CO}_2$  y considerándolo.

#### 2.4.3. Evaluación de la difusión del $\text{O}_2$ y $\text{CO}_2$ a través del empaque de prueba

El método de incremento de concentración se utilizó para determinar la cantidad de gas difundido a través de un empaque permeable. El sistema de transferencia de masa para medir la difusión de gases ( $\text{O}_2$  o  $\text{CO}_2$ ) consistió en un recipiente de plástico cilíndrico con un volumen nominal de 20 L, adaptado con válvulas de entrada y salida de gas. Para desplazar el aire en el contenedor,  $\text{N}_2$  grado industrial se hizo fluir dentro del contenedor y del empaque, una bolsa de 10.4 L. Debido a que las permeabilidades al  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  de la bolsa eran altas, el 90 % de las microperforaciones estaban cubiertas y solo 12 de ellas fueron utilizados para la difusión de gases. La bolsa se llenó con el

gas de prueba ( $O_2$  o  $CO_2$ ) para reemplazar el  $N_2$  y se colocó dentro del contenedor. Posteriormente, las válvulas del contenedor se cerraron y el sistema se selló. La difusión del gas fuera de la bolsa se midió dentro del contenedor en función del tiempo con el analizador de gases  $O_2/CO_2$ . El sistema se colocó en una cámara de enfriamiento a  $8 \pm 1$  °C. La cantidad de  $O_2$  o  $CO_2$  difundido se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{O_2} = \frac{[O_2]}{100}V \quad Q_{CO_2} = \frac{[CO_2]}{100}V \quad (13)$$

donde  $Q_{O_2}$  y  $Q_{CO_2}$  son las cantidades de gas difundido (mL) y  $V$  es el volumen dentro del recipiente, fuera de la bolsa (mL).

#### 2.4.4. Estimación de la permeabilidad al $O_2$ y $CO_2$ a través del empaque de prueba

La transferencia de masa a través del empaque se describe por la ley de difusión de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (14)$$

donde  $C$  es la concentración del gas permeante y  $D$  es el coeficiente de difusividad. La coordenada  $x$  se mide desde la parte inferior de la película, que tiene un espesor  $L$ . La concentración inicial del permeante en la película es cero; en la cara inferior ( $x = 0$ ) la concentración es  $C_1$  y en la cara superior ( $x = L$ ), a través de la cual la sustancia difusora emerge, la concentración se mantiene en cero. Por lo tanto, las condiciones iniciales y frontera son:

$$C(x, 0) = 0 \quad C(0, t) = C_1 \quad C(L, t) = 0 \quad (15)$$

La solución general en función de la posición  $x$  y tiempo  $t$  es (Crank, 1975):

$$C = C_1 \left( 1 - \frac{x}{L} \right) - \frac{2C_1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} e^{-\frac{n^2 \pi^2 D t}{L^2}} \quad (16)$$

El flujo de masa,  $J$  que emerge de la película (en  $x = L$ ) viene dado por:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=L} \quad (17)$$

donde  $A$  es el área de transferencia ( $\text{cm}^2$ ). La cantidad de gas difundido que ha pasado a través de la membrana en el tiempo  $t$  viene dada por  $Q = A \int_0^t J dt$ ; por lo tanto, después de obtener  $\partial C / \partial x$ , la cantidad de gas difundido se expresa por la siguiente serie infinita:

$$Q = ALC_1 \left[ \frac{Dt}{L^2} - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2 Dt}{L^2}} \right] \quad (18)$$

A medida que  $t$  crece, los términos que implican los exponenciales se desvanecen y la cantidad de gas difundido a través de la membrana aumenta linealmente con el tiempo, es decir, se ha alcanzado el estado estable. Este estado estacionario se logra cuando el número de Fourier de masa es mayor que 0.45 (Crank, 1975). En esta condición, el flux de masa se puede expresar utilizando la primera ley de difusión  $J = -D(dC/dx)$ , que se puede resolver para dar la siguiente ecuación:

$$J = D \frac{C_1 - C_2}{L} \quad (19)$$

La concentración puede expresarse en términos de solubilidad,  $S$  y presión parcial,  $p_A$  del gas con  $C = Sp_A$ . De esta manera, el flux másico es:

$$J = DS \frac{p_{A_1} - p_{A_2}}{L} = \frac{Q}{At} \quad (20)$$

Después de alcanzar el estado estacionario, se puede obtener la pendiente ( $Q/t$ ) de la porción lineal de un gráfico  $Q$  contra tiempo y la permeabilidad,  $P_M = DS$ , se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$P_M = \frac{QL}{At (p_{A_1} - p_{A_2})} \quad (21)$$

#### 2.4.5. Simulación de las concentraciones de $O_2$ y $CO_2$ con diferentes permeabilidades

Hayakawa *et al.* (1975) utilizaron los balances de masa para las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  en estado no estacionario:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = 100 \left[ \frac{AP_{M_{O_2}} P_{atm}}{VL} \left( \frac{[O_2]_o}{100} - \frac{[O_2]}{100} \right) - \left( \frac{m r_{O_2}}{V} \right) \right] \quad (22)$$

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = 100 \left[ \frac{AP_{M_{CO_2}} P_{atm}}{VL} \left( \frac{[CO_2]_o}{100} - \frac{[CO_2]}{100} \right) + \left( \frac{m r_{CO_2}}{V} \right) \right] \quad (23)$$

donde  $[O_2]_o$  y  $[CO_2]_o$  son las concentraciones fuera del empaque (%mol),  $P_{M_{O_2}}$  y  $P_{M_{CO_2}}$  las permeabilidades al  $O_2$  y  $CO_2$  ( $mL\ cm\ cm^{-2}\ h^{-1}\ cmHg^{-1}$ ),  $P_{atm}$  presión atmosférica (76 cmHg),  $m$  la masa del fruto (kg),  $A$  el área de transferencia ( $cm^2$ ),  $V$  el volumen libre (mL) y  $L$  el espesor del empaque (mm). Un código de computadora se realizó para predecir las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  dentro del empaque en función del tiempo. Estas ecuaciones diferenciales ordinarias se resolvieron simultáneamente utilizando el método de Euler modificado. Los modelos de inhibición propuestos se probaron para seleccionar el mejor ajuste utilizando los parámetros correspondientes de Michaelis-Menten ( $K_m$ ,  $V_m$  y  $K_i$ ) para  $O_2$  y  $CO_2$ .

Cinco frutos de aguacate se seleccionaron al azar y se colocaron en bolsas TrendLife®, para atmósfera modificada que fueron selladas herméticamente con cinchos de plástico. El área de transferencia era de  $40 \times 74\ cm^2$  y solo se descubrieron 12 microperforaciones (diámetro de 0.7 mm, cada una). A través de un puerto de muestreo, las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  dentro de la bolsa se midieron en función del tiempo a  $8 \pm 1\ ^\circ C$ , hasta que las concentraciones se estabilizaron. La validación del modelo se realizó comparando las concentraciones simuladas y experimentales en función del tiempo. Finalmente, utilizando el modelo de velocidad de respiración de mejor ajuste, a través de simulación, se propusieron nuevas permeabilidades de  $O_2$  y  $CO_2$  para almacenar aguacate.

#### 2.4.6. Diseño de experimentos

Tres diseños completamente al azar se utilizaron. Para la evaluación de las velocidades de respiración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, los factores fueron las concentraciones de O<sub>2</sub> (6, 15 y 21 %mol) y CO<sub>2</sub> (0 y 8 %mol). Para la permeabilidad al O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, la variable de respuesta fue la cantidad de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> difundido a través del empaque, el factor fue el tiempo de transferencia de masa (0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25 y 1.50 h). Para validar el modelo de respiración, las respuestas fueron las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro de la bolsa y el factor fue el tiempo de almacenamiento (0, 24, 48, 72, 96, 120 y 144 h). Se realizaron tres réplicas para cada evaluación. La prueba de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ) se utilizó para comparar medias (Montgomery, 2017).

### 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 2.5.1. Cinéticas de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>

La **Figura 3** muestra los gráficos de Michaelis-Menten para las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> experimental y estimada, en ausencia y presencia del inhibidor (8 %mol CO<sub>2</sub>) a  $8 \pm 1$  °C para los cuatro modelos de inhibición. Las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> de frutos de aguacate variaron entre 5.84 y 24.7 y entre 6.84 y 25.6 mL kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente. En todos los gráficos, se observó el efecto de la baja concentración de oxígeno y la presencia de inhibidor (CO<sub>2</sub>) sobre la velocidad de respiración. Este comportamiento fue similar al de otras frutas y hortalizas almacenadas en atmósferas modificadas (Song *et al.*, 2002; Geysen *et al.*, 2005; Cliffe-Byrnes y O'Beirne, 2007).

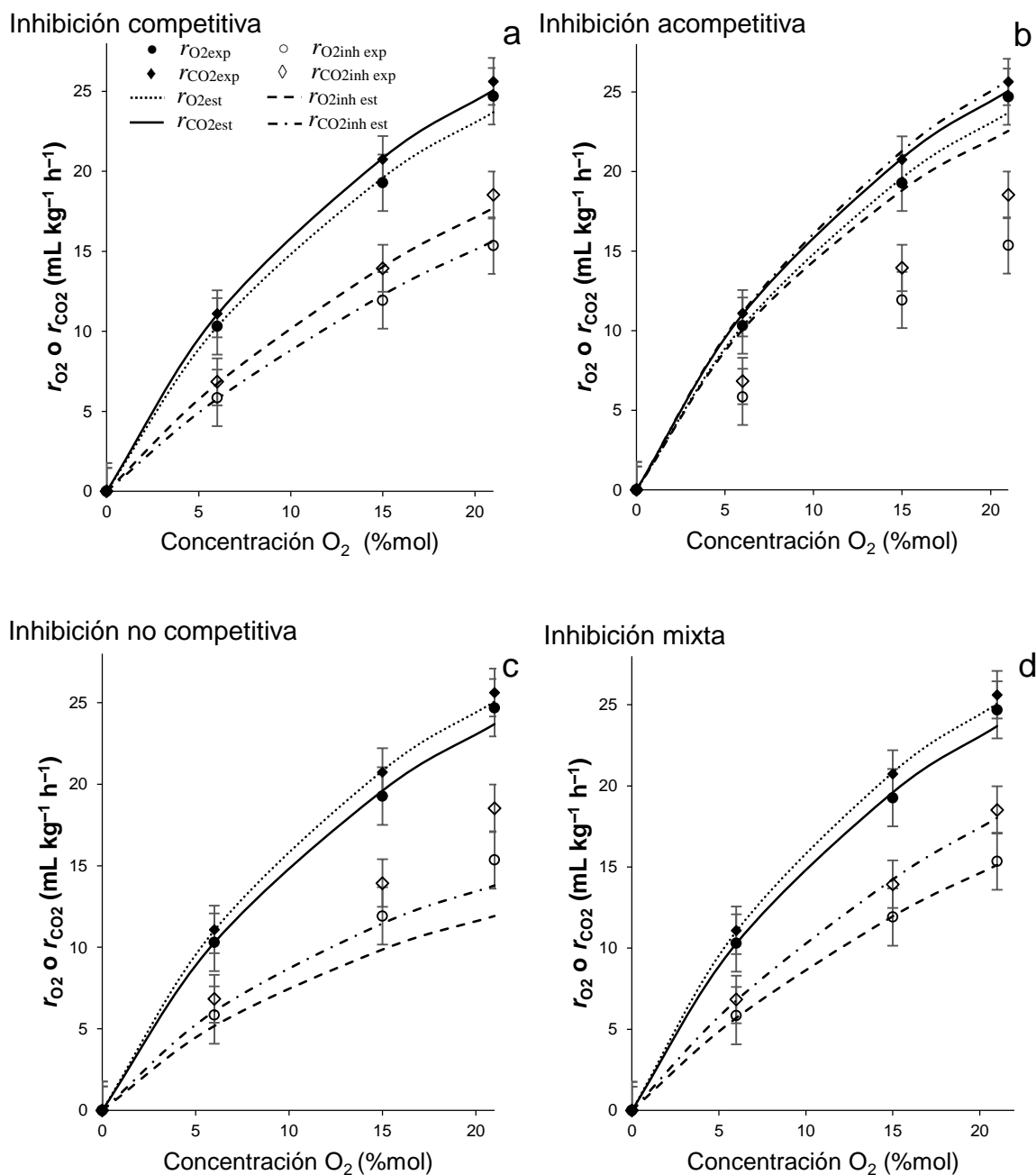
Las velocidades mínimas para el consumo de O<sub>2</sub> (5.84 mL kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) y producción de CO<sub>2</sub> (6.84 mL kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) se obtuvieron para el tratamiento con 6 %mol O<sub>2</sub> y 8 %mol CO<sub>2</sub>. Castellanos *et al.* (2017) midieron las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> que van desde 4.17 a 25 mL kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a 6 °C bajo diferentes concentraciones de gas para aguacate "Hass". Russo *et al.* (2014) reportaron velocidades de producción de CO<sub>2</sub> de hasta 25 mL kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> y concluyeron que los tratamientos con las

concentraciones más altas de CO<sub>2</sub> tenían las actividades de respiración más bajas en aguacate "Fuerte" a 10 ± 1 °C. Ahmed *et al.* (2007) reportaron velocidades de consumo de O<sub>2</sub> de 6.99 a 9.79 y 3.32 a 6.03 mL kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a 5 °C cuando se usan atmósferas con 2 %O<sub>2</sub> y de 6 a 8 %CO<sub>2</sub> en aguacate "Hass" y "Fuerte", respectivamente. Las diferencias pueden atribuirse a los diferentes cultivares, estado de maduración y temporada de cosecha (Yahia, 1997).

El mecanismo de acción del dióxido de carbono en la regulación del metabolismo respiratorio en frutas y hortalizas es complejo. La alta exposición al CO<sub>2</sub> inhibe la actividad de varias enzimas involucradas en el metabolismo de la respiración (Kerbel *et al.*, 1990). Con base a la ley de acción de masas, la alta concentración de CO<sub>2</sub> provoca una reducción de la velocidad de respiración y disminuye la energía disponible para los procesos metabólicos. El CO<sub>2</sub> puede causar una menor disponibilidad de donantes de electrones proporcionados por el ciclo de Krebs, lo que ralentiza el metabolismo general y la fosforilación oxidativa, con la disminución del ATP disponible. Las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> en presencia del inhibidor (8 %mol CO<sub>2</sub>) se simularon adecuadamente utilizando los modelos de inhibición competitiva (**Figura 3a**) y mixta (**Figura 3d**); considerando las cuatro velocidades de respiración para cada modelo de inhibición, los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) fueron 0.967 y 0.968, respectivamente. A partir del análisis de regresión lineal utilizando el gráfico de doble recíproco o Lineweaver-Burk (LB) en el modelo de inhibición competitiva, las ordenadas en el origen (intercepto-y) para la velocidad de consumo de O<sub>2</sub> en ausencia y presencia del inhibidor fueron muy similares (0.020 y 0.022 kg h mL<sup>-1</sup>), como se esperaba para este modelo. Las ordenadas en el origen para la velocidad de producción de CO<sub>2</sub>, sin inhibidor y con inhibidor, también fueron muy cercanas (0.020 y 0.019 kg h mL<sup>-1</sup>). Por otro lado, en el modelo de inhibición mixta hay un grado de libertad adicional para el ajuste y es por eso que el coeficiente de determinación es alto ( $R^2 = 0.968$ ). Para este modelo, no se espera que la ordenada al origen, ni la pendiente, ni la abscisa al origen fueran iguales con y sin inhibidor.

En el caso de los modelos de inhibición acompetitiva y no competitiva (**Figuras 3b y 3c**), las velocidades de respiración en presencia del inhibidor no se estimaron





**Figura 3.** Velocidades de consumo de  $O_2$  y producción de  $CO_2$  experimentales (exp) y estimadas (est), en ausencia y presencia del inhibidor (8 %mol  $CO_2$ ) para el aguacate “Hass” a  $8 \pm 1$  °C. LSD para  $r_{O_2} = 3.53$  mL  $kg^{-1}$   $h^{-1}$  y  $r_{CO_2} = 2.92$  mL  $kg^{-1}$   $h^{-1}$ ,  $\alpha = 0.05$ ).

satisfactoriamente ( $R^2 = 0.797$  y  $R^2 = 0.932$ ), respectivamente. En la inhibición acompetitiva, el análisis de regresión utilizando el gráfico LB mostró que las pendientes para el consumo de  $O_2$  (0.462 y 0.919  $kg\ h\ \%mol\ mL^{-1}$ ) y la producción de  $CO_2$  (0.426 y 0.775  $kg\ h\ \%mol\ mL^{-1}$ ) sin y con inhibidor, fueron diferentes (deberían haber sido similares), causando una mala estimación. Del mismo modo, para la inhibición no competitiva, las abscisas en el origen (intercepto-x) fueron diferentes para la velocidad de consumo de  $O_2$  en ausencia [ $-0.044\ \%mol^{-1}$ ] y presencia [ $-0.024\ \%mol^{-1}$ ] del inhibidor, y deben estar muy cercanas. Para la producción de  $CO_2$ , también fueron diferentes,  $-0.046$  (sin inhibidor) y  $-0.024\ \%mol^{-1}$  (con inhibidor), respectivamente.

### 2.5.2. Estimación de los parámetros

Las velocidades máximas y las constantes de afinidad para las velocidades de consumo de  $O_2$  en ausencia del inhibidor ( $CO_2$ ) fueron  $V_{m_{O_2}} = 49.5\ mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$  y  $K_{m_{O_2}} = 22.9\ \%mol\ O_2$ . En el caso de las velocidades de producción de  $CO_2$ , los parámetros cinéticos correspondientes fueron  $V_{m_{CO_2}} = 51.0\ mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$  y  $K_{m_{CO_2}} = 21.8\ \%mol\ CO_2$ . El

**Cuadro 3** muestra los parámetros estimados de los modelos de respiración basados en los diferentes tipos de inhibición.

Las constantes de disociación para los complejos enzima-inhibidor y enzima-sustrato-inhibidor utilizados para modelar el efecto inhibitor del  $CO_2$  sobre la velocidad de consumo de  $O_2$  fueron  $K_{I_{O_2}}^c$ ,  $K_{I_{O_2}}^n$ ,  $K_{I_{O_2}}^{m_1}$  de 8.10  $\%mol$  y  $K_{I_{O_2}}^u$ ,  $K_{I_{O_2}}^{m_2}$  de 75.7  $\%mol$ . Para la velocidad de producción de  $CO_2$ , estas constantes de disociación fueron  $K_{I_{CO_2}}^c$ ,  $K_{I_{CO_2}}^n$ ,  $K_{I_{CO_2}}^{m_1}$  de 9.78  $\%mol$  y  $K_{I_{CO_2}}^u$ ,  $K_{I_{CO_2}}^{m_2}$  de  $-152.2\ \%mol$ . En la inhibición competitiva, las velocidades de respiración máximas no cambiaron ( $V_{m_{O_2,app}} = V_{m_{O_2}}$  y  $V_{m_{CO_2,app}} = V_{m_{CO_2}}$ ) porque el inhibidor no interfiere en la disociación del complejo enzima-sustrato. Las constantes de afinidad aparentes ( $K_{m_{O_2,app}}$  y  $K_{m_{CO_2,app}}$ ) aumentaron en presencia del inhibidor con respecto a las ( $K_{m_{O_2}}$  y  $K_{m_{CO_2}}$ ) sin inhibidor, de acuerdo con el modelo cinético. En el caso de la inhibición mixta, la velocidad máxima aparente disminuyó

**Cuadro 3.** Parámetros del modelo de respiración para aguacate "Hass" a  $8 \pm 1$  °C.

| Parámetro   | Modelo de inhibición |              |                |       |
|---|----------------------|--------------|----------------|-------|
|   | Competitiva          | Acompetitiva | No competitiva | Mixta |
| $V_{m_{O_2,app}}$ (mL kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )  | 49.5                 | 44.8         | 24.9           | 44.8  |
| $V_{m_{CO_2,app}}$ (mL kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ) | 51.0                 | 53.9         | 28.1           | 53.9  |
| $K_{m_{O_2,app}}$ (%mol)                                  | 45.5                 | 20.7         | 22.9           | 41.2  |
| $K_{m_{CO_2,app}}$ (%mol)                                 | 39.5                 | 22.9         | 21.8           | 41.8  |
| $R_{O_2,0\% CO_2}^2$                                      | 0.951                | 0.951        | 0.951          | 0.951 |
| $R_{O_2,8\% CO_2}^2$                                      | 0.962                | 0.954        | 0.957          | 0.962 |
| $R_{CO_2,0\% CO_2}^2$                                     | 0.958                | 0.958        | 0.958          | 0.958 |
| $R_{CO_2,8\% CO_2}^2$                                     | 0.987                | 0.979        | 0.978          | 0.988 |

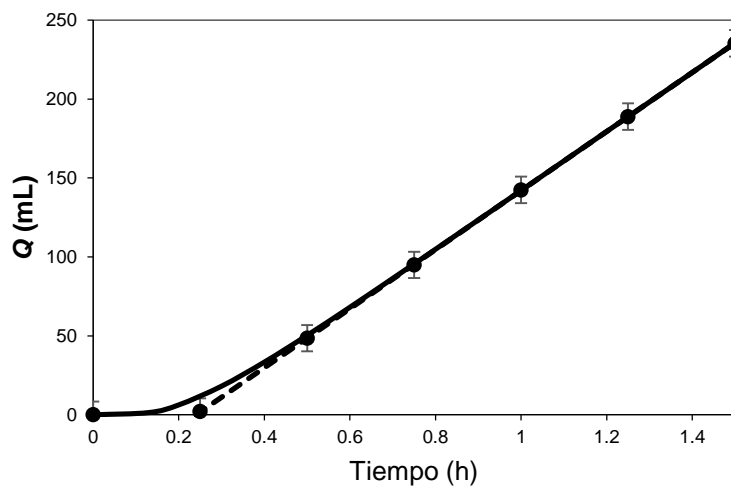
para la velocidad de consumo de O<sub>2</sub> en presencia del inhibidor, como debería ser. Sin embargo, para la velocidad de producción de CO<sub>2</sub>, este parámetro aumentó, lo que es contrario a lo que establece la inhibición mixta. Las constantes de afinidad aparentes para O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> aumentaron en presencia del inhibidor; esto indica que la interacción enzima-inhibidor predomina sobre la interacción enzima-sustrato-inhibidor.

Para la inhibición acompetitiva, tanto la velocidad máxima aparente como la constante de afinidad para el O<sub>2</sub> disminuyeron en presencia del inhibidor en casi la misma proporción, de acuerdo a este tipo de inhibición. Este efecto no se encontró para el CO<sub>2</sub>, porque al contrario de lo esperado, ambos parámetros aparentes aumentaron. En la inhibición no competitiva, tanto para O<sub>2</sub> como para CO<sub>2</sub>, el comportamiento típico se cumplió, ya que la velocidad máxima aparente disminuyó y la constante de afinidad no cambió. Se puede notar que, dados los altos coeficientes de determinación, los modelos de inhibición competitiva o mixta podrían usarse para predecir el consumo de O<sub>2</sub> y las velocidades de producción de CO<sub>2</sub> en función de las concentraciones de oxígeno e inhibidor.

### 2.5.3. Estimación de la permeabilidad

La **Figura 4** muestra la cantidad total de O<sub>2</sub> difundido ( $Q$ ) experimental (exp) y estimada (est) a través del empaque en función del tiempo a  $8 \pm 1$  °C. En el análisis de regresión para la sección lineal del gráfico, no se consideraron las cantidades de gas difundido correspondientes a 0, 1 y 2 h, y el estado estacionario se simuló adecuadamente ( $R^2 = 0.999$ ). La cantidad estimada de gas difundido se modeló satisfactoriamente ( $R^2 = 0.999$ ) al utilizar diez términos de la serie infinita. Las permeabilidades promedio para el empaque a  $8 \pm 1$  °C fueron  $1.06 \times 10^{-4}$  y  $1.04 \times 10^{-4}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup> para O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, respectivamente.

El orden de las permeabilidades obtenidas fue mayor que las reportadas para las películas de polímeros usuales usadas en un empaque para atmósfera modificada (Robertson, 2012), así como para aquellas reportadas para poliamidas (Mangaraj *et al.*, 2009). Además, Castellanos *et al.* (2017) almacenaron aguacate en un empaque para atmósfera modificada a 12 °C; utilizaron bolsas de polietileno y polipropileno de



**Figura 4.** Cantidad total de  $O_2$  difundido ( $Q$ ) experimental (exp) y estimada (est) a través del empaque en función del tiempo a  $8 \pm 1$  °C. LSD para  $Q = 16.7$  mL de  $O_2$ ,  $\alpha = 0.05$ ). La línea discontinua indica estado estacionario.

baja densidad con una perforación de 280  $\mu\text{m}$  y reportaron permeabilidades al  $\text{O}_2$  de  $3.03 \times 10^{-7}$  y  $6.84 \times 10^{-7}$   $\text{mL cm cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{cmHg}^{-1}$ , y permeabilidades al  $\text{CO}_2$  de  $1.39 \times 10^{-6}$  y  $5.36 \times 10^{-6}$   $\text{mL cm cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{cmHg}^{-1}$ , respectivamente. Estas diferencias en permeabilidades se pueden atribuir a la cantidad y el tamaño de las microperforaciones en el empaque a través del cual se difundieron los gases.

#### **2.5.4. Predicción de las concentraciones de $\text{O}_2$ y $\text{CO}_2$ dentro de un empaque para atmósfera modificada**

La **Figura 5** muestra las concentraciones de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  experimentales (exp) y estimadas (est) para aguacate “Hass” dentro de un empaque para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. Durante las primeras 48 h de almacenamiento, la concentración experimental de  $\text{O}_2$  dentro del empaque para atmósfera modificada disminuyó rápidamente de 21 a 16 %mol, aproximadamente. Por otro lado, la concentración experimental de  $\text{CO}_2$  aumentó progresivamente para establecer una estabilidad relativa en torno al 7 %mol después de 96 h de almacenamiento. La velocidad de respiración se estabilizó a las 96 h permitiendo que el empaque establezca un equilibrio dinámico entre la atmósfera interna y externa. Como se esperaba, la atmósfera que rodea al fruto se modificó, tanto por el comportamiento respiratorio del fruto como por el efecto de las microperforaciones del empaque (Radziejewska - Kubzdela y Czaczyk, 2017). Esta marcada caída en la concentración de  $\text{O}_2$  durante las primeras horas de almacenamiento se ha descrito para otros productos almacenados en envases de atmósfera modificada, según lo informado por Song *et al.* (2002) y Charoenchaitawornchit *et al.* (2002) quienes modelaron la respiración en moras almacenadas a 15 °C y mango cv. Nam Dok Mai a 13 °C. Observaron un rápido aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  dentro del empaque al comienzo del período de almacenamiento.

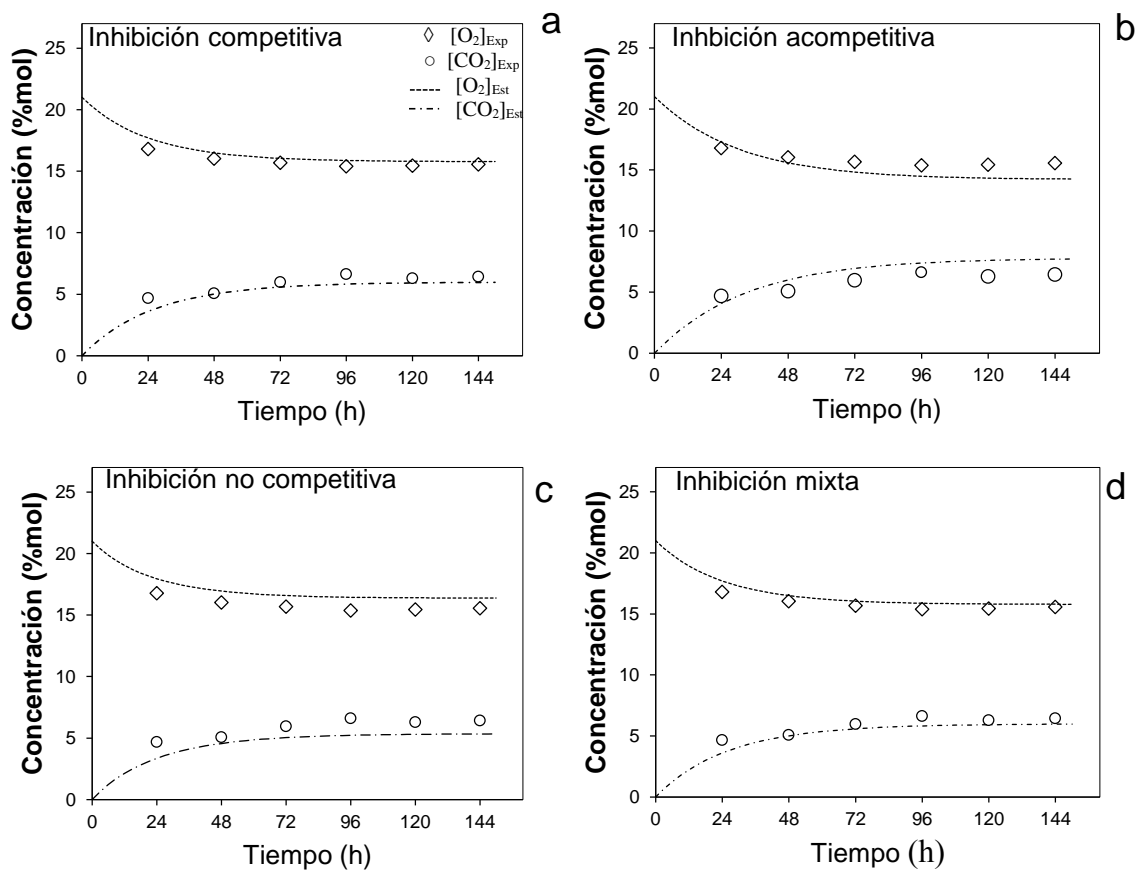
Se obtuvo una buena correlación entre las concentraciones predichas y experimentales para  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  utilizando los modelos cinéticos enzimáticos con inhibición competitiva (**Figura 5a**) ( $R^2_{\text{O}_2} = 0.983$ ;  $R^2_{\text{CO}_2} = 0.976$ ) e inhibición mixta (**Figura 5d**) ( $R^2_{\text{O}_2} = 0.984$ ;  $R^2_{\text{CO}_2} = 0.975$ ). Esto indica que las predicciones para las concentraciones de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  utilizando los balances de masa con reacción y los

modelos de inhibición competitiva o mixta estimaron adecuadamente la respiración de aguacate dentro del empaque para atmósfera modificada. Morales-Castro *et al.* (1994) encontraron un ajuste razonable entre las concentraciones de gas teóricas y experimentales dentro de empaques microporosos para maíz dulce en mazorca utilizando las ecuaciones diferenciales de un balance de masa.

Sin embargo, en el modelo de inhibición mixta utilizado en este trabajo, los parámetros cinéticos estimados no generaron el comportamiento esperado, es decir, la velocidad máxima aparente de CO<sub>2</sub> no disminuyó con el inhibidor y la constante de disociación del complejo enzima-sustrato-inhibidor para CO<sub>2</sub>, fue negativo (-152.2 %mol). En el caso del modelo de inhibición competitiva (**Figura 5a**), los parámetros cinéticos estimados produjeron el comportamiento esperado, por ejemplo, la constante de afinidad aparente para O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> aumentó en presencia del inhibidor, y los coeficientes de determinación para las concentraciones estimadas y experimentales para O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> fueron satisfactorios ( $R^2_{O_2} = 0.983$ ;  $R^2_{CO_2} = 0.976$ ).

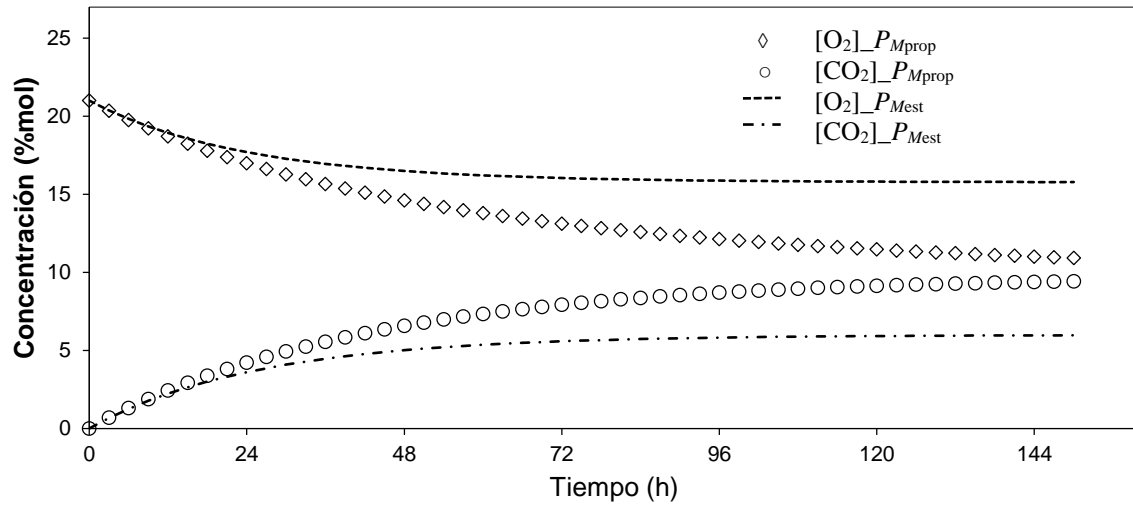
Por esta razón, el modelo de inhibición competitiva se consideró el mejor para estimar ambas concentraciones durante el almacenamiento de aguacate "Hass" en el empaque de atmósfera modificada.

Los modelos de inhibición acompetitiva (**Figura 5b**) y no competitiva (**Figura 5c**) no mostraron un ajuste adecuado ( $R^2_{O_2} = 0.956$ ;  $R^2_{CO_2} = 0.957$  y  $R^2_{O_2} = 0.989$ ;  $R^2_{CO_2} = 0.980$ , respectivamente) a las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro del empaque para atmósfera modificada. Uno de los aspectos fundamentales en el diseño de un empaque para atmósfera modificada es el conocimiento de la permeabilidad del empaque a los gases para generar concentraciones relativamente bajas de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, mediante simulación utilizando la ecuación de inhibición competitiva como el modelo de velocidad de respiración y los principios de balance de masa se estimaron las permeabilidades de película para generar concentraciones cercanas al 11 %mol O<sub>2</sub> y 9.5 %mol CO<sub>2</sub> (**Figura 6**), cuando se logra una atmósfera modificada pasiva utilizando aguacate "Hass" almacenado a  $8 \pm 1$  °C. Con base en estas permeabilidades de película propuestas para O<sub>2</sub> ( $2.9 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>) y CO<sub>2</sub> ( $4.1 \times 10^{-5}$  mL cm cm<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> cmHg<sup>-1</sup>), las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> predichas dentro del empaque



**Figura 5.** Concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  experimentales (exp) y estimadas (est) para aguacate "Hass" dentro de un empaque para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. LSD para  $[O_2] = 0.57$  %mol y  $[CO_2] = 0.61$  %mol,  $\alpha = 0.05$ ).





**Figura 6.** Concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> estimadas para aguacate “Hass” dentro de un empaque para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C utilizando las permeabilidades propuestas (prop) y estimadas (est).

después de 72 h de almacenamiento fueron 13.1 y 7.9 %mol, respectivamente. En contraste, con las permeabilidades (est) del empaque utilizado en el presente estudio, las concentraciones correspondientes fueron 16.0 y 5.6 %mol. Después de 144 h de almacenamiento, las concentraciones predichas usando las permeabilidades de película propuestas fueron 11.0 y 9.5 %mol; mientras que con las permeabilidades (est) del empaque las concentraciones respectivas fueron 15.8 y 6.0 %mol. Las concentraciones de gas predichas se estabilizaron (10.0 %mol O<sub>2</sub> y 9.5 %mol CO<sub>2</sub>) después de 240 h de almacenamiento. De esta manera, mejorar las permeabilidades al O<sub>2</sub> y al CO<sub>2</sub> del empaque puede ser útil para prolongar la vida útil de aguacate “Hass”.

## 2.6. CONCLUSIONES

La cinética enzimática de Michaelis-Menten con inhibición competitiva permitió modelar adecuadamente el comportamiento respiratorio de aguacate “Hass” bajo diferentes composiciones gaseosas utilizando un sistema cerrado. Se obtuvo un buen ajuste para las estimaciones de las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> con respecto a las experimentales. Con base en las leyes de difusión de Fick, se estimó satisfactoriamente la permeabilidad y la cantidad total de gas difundido (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) a través del empaque. El modelado matemático, basado en los balances de masa en estado no estacionario y las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>, descrito con un modelo de inhibición competitiva, permitió predecir satisfactoriamente el proceso de respiración de aguacate “Hass” almacenado en un empaque para atmósfera modificada. Además, las concentraciones de gas dentro de un empaque se simularon con permeabilidades propuestas de manera que el sistema alcance concentraciones estables, lo que podría mejorar la atmósfera interna y extender la vida útil de aguacate “Hass” cuando se almacena en un empaque para atmósfera modificada.

## 2.7. LITERATURA CITADA

- Ahmed, D., F. Ahmed, A. El-Mongy, B. Abu-Aziz, and A. Yousef. 2007. Postharvest storage of Hass and Fuerte avocados under modified atmosphere conditions. *J. Appl. Sci. Res.* 3: 267-274.
- Bill, M., D. Sivakumar, A. K. Thompson, and L. Korsten. 2014. Avocado fruit quality management during the postharvest supply chain. *Food Rev. Int.* 30: 169-202.
- Castellanos, D. A., R. Mendoza, R. Gavara, and A. O. Herrera. 2017. Respiration and ethylene generation modeling of "Hass" avocado and feijoa fruits and application in modified atmosphere packaging. *International J. Food Prop.* 20: 333-349.
- Charoenchaitawornchit, A., S. Kanlayanarat, and A. Tongta. 2002. Modeling of respiration and modified atmosphere packaging of mango "nam dok mai". *In: International Conference: Postharvest Unlimited* 599. pp: 489-494.
- Cliffe-Byrnes, V., and D. O'Beirne. 2007. Effects of gas atmosphere and temperature on the respiration rates of whole and sliced mushrooms (*Agaricus bisporus*)—Implications for film permeability in modified atmosphere packages. *J. Food Sci.* 72: E197-E204.
- Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford. 414 p.
- FAOSTAT, R. 2018. Faostat database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Consultado: Septiembre 2019).
- Geysen, S., B. Verlinden, A. Conesa, and B. Nicolai. 2005. Modelling respiration of strawberry (cv. Elsanta) as a function of temperature, carbon dioxide, low and superatmospheric oxygen concentration. *Frutic.* 5: 12-16.
- Gomes, M. H., R. M. Beaudry, D. P. Almeida, and F. X. Malcata. 2010. Modelling respiration of packaged fresh-cut 'Rocha' pear as affected by oxygen concentration and temperature. *J. Food Eng.* 96: 74-79.
- Hayakawa, K. i., Y. S. Henig, and S. G. Gilbert. 1975. Formulae for predicting gas exchange of fresh produce in polymeric film package. *J. Food Sci.* 40: 186-191.
- Iqbal, T., F. A. Rodrigues, P. V. Mahajan, and J. P. Kerry. 2009. Mathematical modeling of the influence of temperature and gas composition on the respiration rate of shredded carrots. *J. Food Eng.* 91: 325-332.
- Kader, A. A. and M. E. Saltveit. 2003. Respiration and gas exchange. *In: Bartz J. A. and J. K. Brecht. (eds). Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables.* Marcel Dekker, Inc., New York, USA. pp 7-29.
- Kerbel, E. L., A. A. Kader, and R. J. Romani. 1990. Respiratory and glycolytic response of suspension-cultured 'Passe Crassane' pear fruit cells to elevated CO<sub>2</sub> concentrations. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 115: 111-114.
- Lee, D. S., K. L. Yam, and L. Piergiovanni. 2008. *Food Packaging and Science Technology*. CRC Press. Boca Raton, FL. 656 p.
- Lee, D., P. Hagggar, J. Lee, and K. Yam. 1991. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. *J. Food Sci.* 56: 1580-1585.
- Mangaraj, S., and T. Goswami. 2011. Modeling of respiration rate of litchi fruit under aerobic conditions. *Food Bioprocess Technol.* 4: 272-281.

- Mangaraj, S., T. Goswami, and P. Mahajan. 2009. Applications of plastic films for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables: a review. *Food Eng. Rev.* 1: 133-158.
- Millar, A. H., J. Whelan, K. L. Soole, and D. A. Day. 2011. Organization and regulation of mitochondrial respiration in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 62: 79-104.
- Montgomery, D. C. 2017. Design and analysis of experiments. 9th ed. John Wiley & Sons Inc. New York. 630 p.
- Morales-Castro, J., M. Rao, J. Hotchkiss, and D. Downing. 1994. Modified atmosphere packaging of head lettuce. *J. Food Process. Pres.* 18: 295-304.
- Oliveira, F., M. Sousa-Gallagher, P. Mahajan, and J. Teixeira. 2012. Development of shelf-life kinetic model for modified atmosphere packaging of fresh sliced mushrooms. *J. Food Eng.* 111: 466-473.
- Pandey, S. K., and T. K. Goswami. 2012. Modelling perforated mediated modified atmospheric packaging of capsicum. *Int. J. Food Sci. Tech.* 47: 556-563.
- Pérez, K., J. Mercado, and H. Soto-Valdez. 2004. Note. Effect of storage temperature on the shelf life of Hass avocado (*Persea americana*). *Food Sci. Technol. Int.* 10: 73-77.
- Radziejewska-Kubzdela, E., and K. Czaczyk. 2017. The effect of organic acid pretreatment and modified atmosphere on shelf life of dry coleslaw mix. *J. Food Process. Pres.* 41: e13044.
- Rennie, T., and S. Tavoularis. 2009. Perforation-mediated modified atmosphere packaging. Part II. Implementation and numerical solution of a mathematical model. *Postharvest Biol. Technol.* 51: 10-20.
- Robertson, G. L. 2012. Food Packaging: Principles and Practice. 3rd ed. CRC press. New York. 734 p.
- Russo, V. C., E. R. Daiuto, R. L. Vietes, and R. E. Smith. 2014. Postharvest parameters of the "Fuerte" avocado when refrigerated in different modified atmospheres. *J. Food Process. Pres.* 38: 2006-2013.
- SIAP. 2019. Sagarpa database. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> (Consultado: Septiembre 2019).
- Song, Y., N. Vorsa, and K. L. Yam. 2002. Modeling respiration–transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry. *J. Food Eng.* 53: 103-109.
- Xiao, L., and M. Kiyota. 2000. Design of a modified atmosphere package for retaining freshness of avocado (*Persea americana*) fruits. *Environ. Control in Biol.* 38: 157-164.
- Yahia, E. 1997. Modified/controlled atmospheres for avocado (*Persea Americana* Mill.). *In Proceedings*, Vol. 3, pp: 13-18. Davis: University of California.
- Yahia, E. M. 1998. Modified and controlled atmospheres for tropical fruits. *In: Janick, J. (ed). Horticultural reviews.* J. Wiley & sons, Inc. New York. Vol. 22 pp: 123-183.
- Yahia, E. M. 2012. Avocado. *In: D. Rees, G. Farrell and J. Orchard (eds). Crop Post-Harvest: Science and Technology: Perishables.* Wiley-Blackwell, Oxford, UK. Vol. 3 pp: 159-186.

## CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA AGUACATE “HASS” ALMACENADO EN UN EMPAQUE PARA ATMÓSFERA MODIFICADA AG FRESH®

### 3.1. ABSTRACT

Refrigeration and modified atmosphere packaging in fruits and vegetables are used to extend their shelf life. The objective of this research was to evaluate physicochemical parameters of quality in avocado (*Persea americana* Mill.) cv. “Hass” during storage in AG Fresh® bags for modified atmosphere at  $8 \pm 1$  °C and contrast them with those obtained during storage at room temperature and refrigeration. Fruits at physiological maturity were stored at  $8 \pm 1$  °C in bags for modified atmosphere packaging made from a commercial plastic film with a thickness of 0.20 mm. A completely randomized design was used. Factors were: type of storage (ambient temperature at  $21 \pm 1$  °C, refrigeration at  $8 \pm 1$  °C, and modified atmosphere at  $8 \pm 1$  °C), storage time (8, 16, 24, and 32 days) and ripening time (2, 4, and 6 days). The physicochemical parameters were firmness, total color difference ( $\Delta E$ ) in exocarp and mesocarp, pH, and total soluble solids (*TSS*). Firmness was reported as the compression force needed to penetrate the tissue. Color parameters,  $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$  were measured in exocarp and mesocarp, pH was evaluated by potentiometry, and *TSS* by refractometry. Firmness,  $\Delta E_{\text{exocarp}}$ ,  $\Delta E_{\text{mesocarp}}$ , pH, and *TSS* were found in a range from 4.0 to 96.6 N, 3.8 to 25.6, 3.2 to 20.3, 6.6 to 7.1, and 5.3 to 7.7 °Brix, respectively. During the storage period, fruits stored in modified atmosphere showed a firmness,  $\Delta E_{\text{exocarp}}$ , and  $\Delta E_{\text{mesocarp}}$  similar to those of fresh fruit. Type of storage showed no effect on pH and *TSS* during the storage period. An AG Fresh® package for modified atmosphere at  $8 \pm 1$  °C allows to prolong the shelf life of “Hass” avocado up to 32 days compared to fruits at room temperature (16 days), because changes in firmness and color are reduced.

**Keywords:** avocado, modified atmosphere, refrigeration, postharvest

### 3.2. RESUMEN

La refrigeración y el empaqueo en atmósfera modificada en frutas y hortalizas se utilizan para extender su vida útil. El objetivo de esta investigación fue evaluar los parámetros fisicoquímicos de calidad en aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. "Hass" durante el almacenamiento en bolsas AG Fresh® para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C y contrastarlas con las obtenidas durante el almacenamiento a temperatura ambiente y refrigeración. Los frutos con madurez fisiológica se almacenaron a  $8 \pm 1$  °C en bolsas para empaqueo en atmósfera modificada hechas de una película de plástico comercial con un espesor de 0.20 mm. Se utilizó un diseño completamente al azar. Los factores fueron: tipo de almacenamiento (temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C), tiempo de almacenamiento (8, 16, 24 y 32 días) y tiempo de maduración (2, 4 y 6 días). Los parámetros fisicoquímicos fueron firmeza, diferencia de color total ( $\Delta E$ ) en exocarpio y mesocarpio, pH y sólidos solubles totales (SST). La firmeza se reportó como la fuerza de compresión necesaria para penetrar el tejido. Los parámetros de color,  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se midieron en exocarpio y mesocarpio, se evaluó el pH por potenciometría y SST por refractometría. La firmeza,  $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ ,  $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ , pH, y SST se encontraron en un rango de 4.0 a 96.6 N, 3.8 a 25.6, 3.2 a 20.3, 6.6 a 7.1 y 5.3 a 7.7 °Brix, respectivamente. Durante el período de almacenamiento, los frutos almacenados en atmósfera modificada mostraron una firmeza,  $\Delta E_{\text{exocarpio}}$  y  $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$  similares a las del fruto fresco. El tipo de almacenamiento no mostró ningún efecto sobre el pH y los SST, durante el período de almacenamiento. Un empaque AG Fresh® para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C permite prolongar la vida útil de frutos de aguacate "Hass" hasta 32 días en comparación con los frutos a temperatura ambiente (16 días), porque se reducen los cambios en la firmeza y el color.

**Palabras clave:** aguacate, atmósfera modificada, poscosecha, refrigeración

### 3.3 INTRODUCCIÓN

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es un fruto muy importante para la economía de México. En 2018, la producción mundial se estimó en 5.92 millones de toneladas; el principal productor fue México, generó 2.02 millones de toneladas y exportó 926,597 toneladas (FAOSTAT, 2018). En México, Michoacán es el estado que genera la mayor producción de este fruto; en 2018 cosechó 173,671 toneladas. Los cultivares más importantes son "Hass" y "Fuerte", este último es un híbrido entre las razas mexicana y guatemalteca (Yahia, 2009). El aguacate es rico en ácidos grasos monoinsaturados, principalmente en ácido oleico, fitosteroles que promueven la salud y compuestos fenólicos como antioxidantes (Zafar y Sidhu, 2018).

El manejo poscosecha es muy importante para conservar la calidad de las frutas y hortalizas; El manejo inadecuado causa pérdidas económicas. Los frutos climatéricos continúan con el proceso de maduración después de la cosecha (Deuchande, 2015). La maduración es el proceso que comienza desde las últimas etapas de crecimiento y desarrollo del fruto hasta las primeras etapas de senescencia. Por lo tanto, el proceso de maduración es una fase importante para conservar los atributos de calidad (Deuchande, 2015). Algunas de las modificaciones asociadas con el proceso de maduración son cambios en el color, la firmeza, el contenido de azúcar, la producción de compuestos volátiles, el metabolismo respiratorio y la producción de etileno (DeEll *et al.*, 2003). El aguacate es un fruto climatérico y su vida poscosecha es corta; el período de almacenamiento es de aproximadamente 5 a 10 días a una temperatura de 18 a 22 °C (Ozdemir y Topuz, 2004).

La refrigeración es una de las tecnologías más utilizadas para conservar el aguacate (Pérez *et al.*, 2004). Según la variedad de aguacate, el tiempo poscosecha es aproximadamente de 2 a 4 semanas con temperaturas entre 4 y 13 °C (Yahia *et al.*, 1997). Comercialmente, el aguacate se almacena entre 5 y 6 °C; si el almacenamiento se realiza a una temperatura más baja, puede causar daño por frío (Bill *et al.*, 2014).

El empacado en atmósfera modificada para frutas y hortalizas se utiliza para extender la vida útil al reducir la velocidad de respiración y, en consecuencia, su velocidad de

degradación; esta reducción se logra modificando la atmósfera dentro del empaque (Oms-Oliu *et al.*, 2010). Los efectos positivos de la atmósfera se pueden verificar principalmente midiendo la firmeza y el color de los frutos; que son propiedades que dependen de la conversión de carbohidratos de las paredes celulares en azúcares y de la degradación de la clorofila en la piel (Castro-Benítez *et al.*, 2005). La atmósfera modificada se puede crear mediante inyección en el empaque con una mezcla de gases de la composición deseada (atmósfera activa) o de la respiración del producto (atmósfera pasiva) (Lee *et al.*, 2010). La atmósfera modificada activa se crea con un flujo continuo de la mezcla gaseosa para reemplazar el aire y la pasiva se logra con el consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>, generados por el fruto dentro del empaque. En ambos casos, la permeabilidad del material de empaque es importante para permitir la difusión de los gases entre el interior del empaque y el exterior, hasta alcanzar la atmósfera estable modificada (Yahia, 2009). El aguacate “Hass” se puede mantener a 7 °C en una atmósfera de 2 a 10 kPa de O<sub>2</sub> y de 4 a 10 kPa CO<sub>2</sub> por hasta nueve semanas, y luego madurar en atmósfera normal a 20 °C, con una buena calidad (Yahia, 2003).

Algunos de los reportes que estudian el efecto de diferentes métodos de conservación (refrigeración, atmósfera modificada o ambos) sobre los parámetros de calidad en frutos de aguacate “Hass” son los siguientes: Revathy *et al.*, 2002; Maarten *et al.*, 2003; Dixon *et al.*, 2004; Pérez *et al.*, 2004; Espinosa-Cruz *et al.*, 2014. González *et al.* (1990) almacenaron frutos de aguacate “Hass” a 5 °C en películas plásticas de polietileno de baja y alta densidad durante cuatro semanas y evaluaron los cambios en la textura, la pérdida de peso y el daño por frío. La textura y las pérdidas de masa se redujeron con el uso de la atmósfera modificada. Meir *et al.* (1997) almacenaron frutos de aguacate “Hass” a 5 °C en bolsas de polietileno de 30 µm de espesor durante nueve semanas. Con la atmósfera modificada, se redujo la pérdida de masa y se retrasó el desarrollo de pigmentación negra en la piel. Russo *et al.* (2014) informaron que una atmósfera modificada de 7.0 %CO<sub>2</sub> y 4.0 %O<sub>2</sub> a 10 °C fue la más efectiva para minimizar la pérdida de masa y la producción CO<sub>2</sub> en aguacate “Fuerte”. Ahmed *et al.* (2007) reportaron el almacenamiento de frutos de aguacate “Hass” (5 y 7 semanas) y “Fuerte” (8 y 9 semanas) en atmósfera modificada a 5 °C. Además de prolongar el tiempo de



almacenamiento, los frutos expuestos a 8 %CO<sub>2</sub> mostraron menos pérdida de masa y mayor firmeza. Los frutos de aguacate se envasan principalmente en cajas de cartón durante el almacenamiento. Hoy en día, se ofrecen bolsas para atmósfera modificada en el mercado con el fin de prolongar la vida útil de las frutas y hortalizas durante el almacenamiento. Sin embargo, estos empaques no siempre se usan; a veces, se usan en forma genérica para diferentes frutos, y hay pocos empaques para un fruto específico; estos, en algunos casos, no cumplen los requisitos para generar la atmósfera óptima, maximizar la conservación y mantener la calidad adecuada. El objetivo de esta investigación fue evaluar los parámetros fisicoquímicos de calidad en frutos de aguacate “Hass” durante el almacenamiento en bolsas AG Fresh® para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C y contrastarlos con los obtenidos durante el almacenamiento a temperatura ambiente y refrigeración.

### **3.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

Aguacates “Hass” (*Persea americana* Mill.) con madurez fisiológica, cosechados en abril de 2017, se seleccionaron con base en tamaño y color. Los aguacates provenían de Tacámbaro, Michoacán, México. Los frutos se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 1 % durante 20 min (Russo *et al.*, 2014) y se almacenaron a  $8 \pm 1$  °C. Se almacenaron en bolsas para atmósfera modificada (AG Fresh® Liner Box) hechas de una película de plástico comercial con un espesor de 0.20 mm (8 mil). Las bolsas se cerraron con cinchos de plástico.

#### **3.4.1. Análisis físicos**

##### **3.4.1.1. Firmeza (*F*)**

La firmeza se evaluó con un medidor de fuerza digital (Chatillon, DFE 100, Scientific Co., Chicago Il., USA.) con una punta esférica de 11 mm de diámetro, que deformaba la pulpa hasta 5 mm de profundidad a una velocidad de 50 mm/min (Maftoonaza *et al.*, 2010). Se tomaron seis réplicas con tres lecturas en cada uno de los frutos. La firmeza se expresó como la fuerza de compresión máxima (N).

#### 3.4.1.2. Diferencia total de color en exocarpio y mesocarpio ( $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ y $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ )

Los parámetros de color en exocarpio y mesocarpio se determinaron con un colorímetro portátil (Minolta CR-210, Osaka, Japón) de acuerdo con la metodología reportada por Maftoonaza *et al.* (2010). Seis réplicas se tomaron con tres lecturas en cada una de los frutos. La diferencia total de color se calculó con la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \left[ (a^* - a_i^*)^2 + (b^* - b_i^*)^2 + (L^* - L_i^*)^2 \right]^{1/2}$$

Los parámetros  $L_i^*$ ,  $a_i^*$  y  $b_i^*$  previo a los tratamientos, se tomaron como referencia.

### 3.4.2. Análisis químicos

#### 3.4.2.1. pH

El pH se evaluó de acuerdo con el método 981.12 de la AOAC (AOAC, 2012). Se preparó una solución con 10 g de pulpa y 20 mL de agua neutra (pH 7) y se mezcló durante 30 s con un homogeneizador (Ultra-Turrax IKA, T18 basic S1, Alemania). Posteriormente, la solución filtrada se colocó en un matraz graduado de 100 mL y se completó hasta la marca con agua neutra. Se tomó una alícuota de 20 mL y se determinó el pH con un potenciómetro (520-A, Orion Research Inc., USA). Se realizaron seis réplicas.

#### 3.4.2.2. Sólidos solubles totales (SST)

Se usó el método oficial 932.12 de la AOAC (AOAC, 2012) para la determinación de los sólidos solubles totales. Se utilizó un refractómetro (300001, Sper Scientific) y se colocaron gotas del extracto de pulpa en el prisma. Los resultados se expresaron en °Brix. Se realizaron seis réplicas.

### 3.4.3. Diseño de experimentos

Se utilizó un diseño completamente al azar. Los factores fueron: tipo de almacenamiento (temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C), tiempo de almacenamiento (0, 8, 16, 24 y 32 días) y tiempo de maduración (0, 2, 4 y 6 días). Las variables de respuesta fueron firmeza, diferencia total de color en exocarpio y mesocarpio, pH y sólidos solubles totales. Se realizaron tres réplicas. En cada tratamiento, se utilizaron seis frutos. Esto arroja un

total de 1080 aguacates con una masa de  $220.4 \pm 11.8$  g. Para cada análisis, se seleccionaron al azar dos frutos por bolsa. Las diferencias entre las medias se evaluaron usando la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

### 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.5.1. Análisis físicos

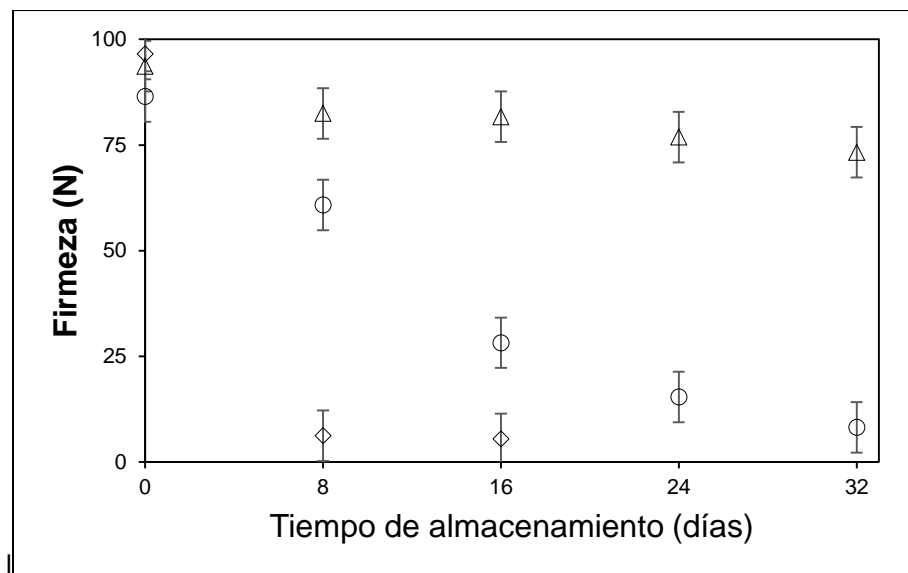
##### 3.5.1.1. Firmeza (*F*)

La **Figura 7** muestra la firmeza de frutos de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, para los diferentes tipos de almacenamiento: temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C.

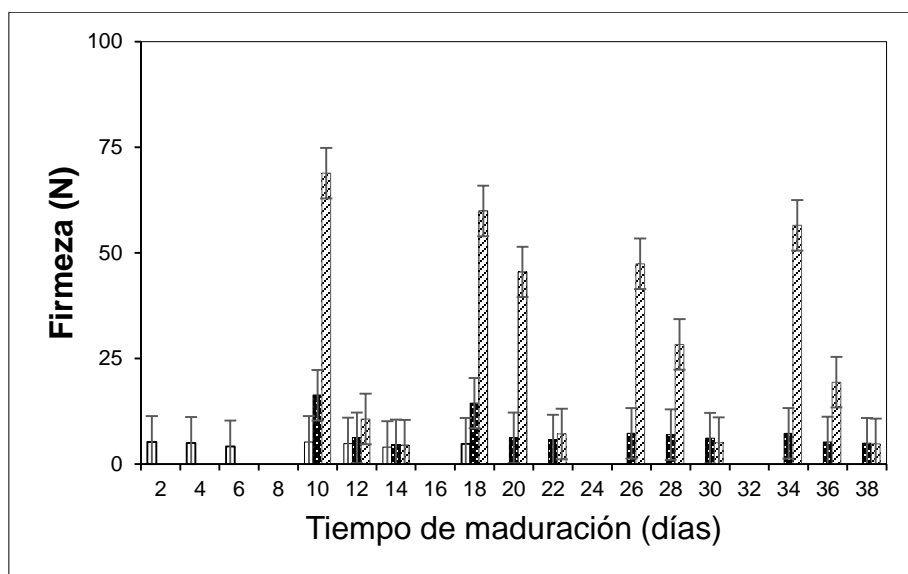
La firmeza inicial de los frutos almacenados a temperatura ambiente, refrigeración y atmósfera modificada fue de 96.0, 86.1 y 93.4 N, respectivamente. En cada día de almacenamiento, la firmeza fue significativamente diferente ( $p \leq 0.05$ ) para cada tipo de almacenamiento. A temperatura ambiente, después de ocho días, los frutos disminuyeron notablemente la firmeza (6.23 N), mientras que los frutos sometidos a refrigeración o atmósfera modificada permanecieron más firmes.

Para ese día, los frutos refrigerados cambiaron a 59.9 N, mientras que, para los frutos en atmósfera modificada, la firmeza fue de 82.8 N. A temperatura ambiente, solo fue posible llevar a cabo el análisis hasta el día 16, donde se obtuvo la menor firmeza (5.57 N), porque en los días posteriores al día 18, los frutos estaban en malas condiciones. La retención de firmeza para los frutos a temperatura ambiente, refrigeración y atmósfera modificada en el día 16 de almacenamiento fue de 5.8, 32.8 y 87.2 %, en comparación con el día 0, respectivamente. La evaluación de la firmeza después de 32 días mostró que los frutos con atmósfera modificada redujeron el ablandamiento durante el almacenamiento, ya que los frutos retuvieron el 78.6 % de la firmeza, mientras que los frutos en refrigeración solo retuvieron el 9.5 %.

La **Figura 8** muestra la firmeza del fruto durante la maduración a  $21 \pm 1$  °C, evaluada durante 2, 4 y 6 días, después del almacenamiento durante 8, 16, 24 y 32 días, para los diferentes tipos de almacenamiento: temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C.



**Figura 7.** Firmeza de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C ( $\diamond$ ), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C ( $\circ$ ) y en atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C ( $\Delta$ ). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 12 N,  $\alpha = 0.05$ ).



**Figura 8.** Firmeza en la maduración de aguacate “Hass” a  $21 \pm 1$  °C durante 2, 4 y 6 días, después de almacenado por 8, 16, 24 y 32 días en temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C ( $\square$ ), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C ( $\blacksquare$ ) y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C ( $\boxtimes$ ). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 12 N,  $\alpha = 0.05$ ).

La firmeza disminuyó ( $p \leq 0.05$ ) en los tres tipos de almacenamiento a medida que pasaron los días de maduración. La firmeza durante la maduración de los frutos a temperatura ambiente, refrigeración y atmósfera modificada se redujo de 5.24 a 4.03, 15.9 a 4.12 y 68.6 a 4.20 N, respectivamente.

La firmeza de los frutos almacenados en atmósfera modificada no disminuyó drásticamente después de los primeros dos días de maduración (10, 18, 26 y 34 días), con 57.1 N después de 34 días. En el caso del almacenamiento en refrigeración, la firmeza obtenida durante esos días fue inferior a 15.9 N.

La firmeza es el parámetro más representativo del proceso de maduración en aguacate "Hass" y se considera un criterio importante para evaluar la vida poscosecha (Ochoa-Ascencio *et al.*, 2009). En general, estos resultados coinciden con lo reportado por Espinoza-Cruz *et al.* (2014) quienes concluyeron que el uso de bolsas microperforadas en aguacate "Hass" permite mantener una mejor firmeza en relación con los frutos almacenados en una atmósfera normal.

Valle-Guadarrama *et al.* (2013) evaluaron el efecto de cambiar la concentración de O<sub>2</sub> en frutos de aguacate "Hass" almacenados en atmósfera normal (21 %mol O<sub>2</sub>) y en atmósfera controlada (5.3 %mol O<sub>2</sub>) a 20 °C. Estos investigadores informaron una retención de firmeza del 7 % en frutos almacenados en atmósfera normal en el día 11 de almacenamiento, mientras que para los frutos en atmósfera controlada 30 % de retención. En comparación con los resultados obtenidos en la presente investigación, en el día 16 de almacenamiento para frutos en atmósfera modificada (8 ± 1 °C), la retención de firmeza fue del 87.2 %.

Ahmed *et al.* (2007) estudiaron el efecto de las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en la calidad de frutos de aguacate "Hass" y "Fuerte". Reportaron en frutos mantenidos a 20 °C, una marcada disminución en la firmeza, reteniendo solo 27 y 21 % en aguacate "Hass" y "Fuerte", respectivamente, durante dos a tres semanas de maduración.

La disminución de la firmeza puede atribuirse a la actividad de la poligalacturonasa y la pectinmetilesterasa, que aumentan notablemente durante la maduración (Roe y Bruemmer, 1981). La pectinmetilesterasa elimina los grupos metoxilo de los constituyentes pécticos de la pared celular, que posteriormente se despolimerizan por

la poligalacturonasa, reduciendo la adhesión intracelular y la rigidez de los tejidos (Alonso *et al.*, 1997). Por otro lado, la temperatura influye en la velocidad de las reacciones metabólicas. A medida que aumenta la temperatura, los procesos enzimáticos se aceleran, hasta que se alcanza la senescencia.

La mejor retención de firmeza en la atmósfera modificada se debe principalmente a las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> generadas dentro del empaque. Una reducción en la concentración de oxígeno provoca una disminución en las velocidades de reacción, ralentizando la maduración (Sandhya, 2010). La exposición al dióxido de carbono reprime la biosíntesis de etileno en el fruto (Kader, 1986).

### 3.5.1.2. Diferencia total de color en exocarpio ( $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ )

La **Figura 9** muestra la diferencia total de color en el exocarpio de frutos de aguacate “Hass” almacenados durante 8, 16, 24 y 32 días, a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C.

Se observa el efecto positivo de la manipulación a baja temperatura y atmósfera modificada durante el almacenamiento, es decir, los frutos conservaron el color característico durante más tiempo en comparación con los de temperatura ambiente. Los cambios en el color de los frutos en los días ocho y 16 de almacenamiento fueron diferentes ( $p \leq 0.05$ ) a temperatura ambiente en comparación con la refrigeración o la atmósfera modificada. La diferencia total de color evaluada en frutos a temperatura ambiente después de ocho días fue de 20.3 y no hubo diferencia ( $p > 0.05$ ) en comparación con los frutos almacenados durante 16 días (21.3).

La diferencia total de color en el exocarpio de frutos en refrigeración o atmósfera modificada, hasta el día 24 de almacenamiento, no mostró diferencias ( $p > 0.05$ ). Durante estos días, la diferencia total de color se mantuvo por debajo de 7.1. Sin embargo, en el día 32 de almacenamiento, hubo un efecto ( $p \leq 0.05$ ) de la atmósfera modificada en el color del exocarpio, con respecto a la refrigeración, obteniendo una diferencia total de color de 5.6 y 9.8, respectivamente.

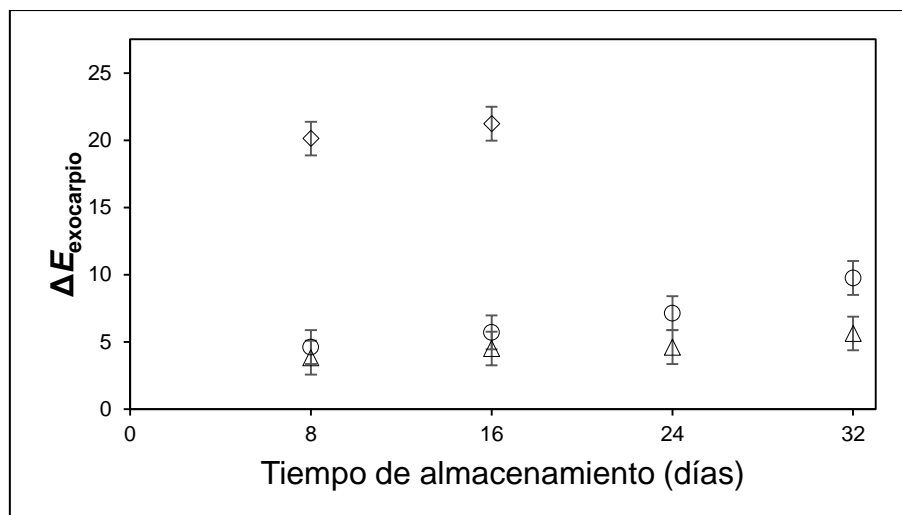
En los frutos almacenados en una atmósfera modificada, se observó la menor variación en la diferencia total de color (3.8). Para el mismo tipo de almacenamiento, el tiempo de almacenamiento (8-32 días) no tuvo efecto en la diferencia total de color.

Esto indica que el color no cambió significativamente durante este período; con un color más similar al del día 0, en comparación con los otros tipos de almacenamiento. Por otro lado, la coordenada de color  $a^*$ , durante el almacenamiento a temperatura ambiente desde el primer día hasta el día 16 de almacenamiento, aumentó de  $-13.0$  a  $-2.0$ . Mientras que los parámetros de color  $L^*$  y  $b^*$  disminuyeron de  $36.2$  a  $26.7$  y  $17.7$  a  $3.0$ , respectivamente. Esto implica que los frutos de aguacate mostraron un cambio de color en el exocarpio de verde oscuro a gris oscuro.

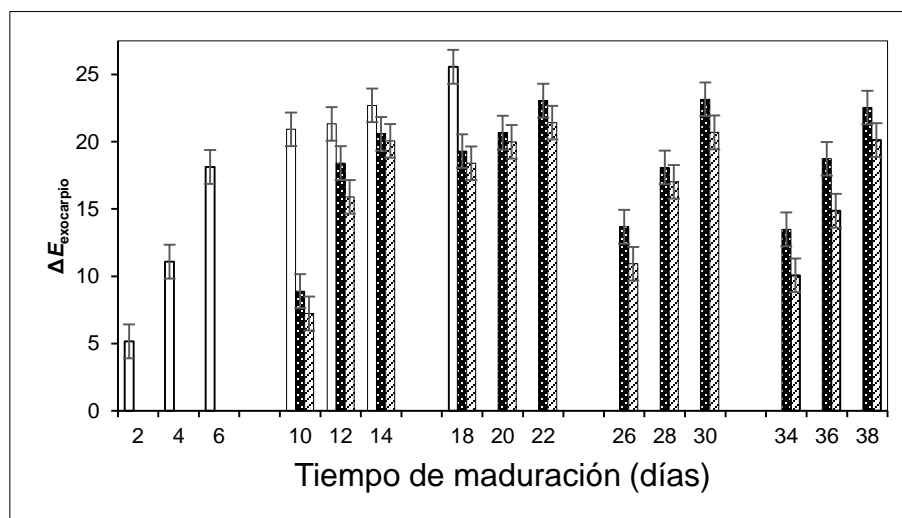
La **Figura 10** muestra la diferencia total de color en exocarpio durante la maduración a  $21 \pm 1$  °C, evaluada durante 2, 4 y 6 días, después del almacenamiento durante 8, 16, 24 y 32 días, a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. Como se esperaba, la diferencia total de color mostró un aumento ( $p \leq 0.05$ ) para los tres tipos de almacenamiento a medida que pasaban los días de maduración. Además, el efecto del tipo de almacenamiento en los atributos de color en los frutos es apreciable, ya que los frutos en atmósfera modificada mostraron la menor diferencia de color total (7.2).

Los frutos almacenados en atmósfera modificada durante 8 días más dos días de maduración (10 días), permitieron mantener el 34.6 % de la diferencia total de color con respecto a los de temperatura ambiente. Por otro lado, la diferencia total de color obtenida en los frutos a temperatura ambiente del día 10 al día 18 de maduración cambió de 20.9 a 26.0.

Durante estos días, los frutos a temperatura ambiente mostraron un grado avanzado de maduración (negro/oscuro) mientras que los almacenados en refrigeración o atmósfera modificada todavía tenían áreas de color verde oscuro. En la etapa final de análisis, específicamente durante los días 34 y 36, el tipo de almacenamiento tuvo un efecto significativo en el color de los frutos. Los frutos almacenados en atmósfera modificada durante 32 días más cuatro días de maduración (36 días) generaron los cambios de color más pequeños respecto a los frutos almacenados en refrigeración. El ennegrecimiento de la piel es una de las características directamente relacionadas con el grado de maduración de aguacate "Hass" (García *et al.*, 2005). La evolución obtenida de las coordenadas de color concuerda con el comportamiento reportado por



**Figura 9.** Diferencia total de color en exocarpio ( $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ ) de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C (◇), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C (○) y en atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C (Δ). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 2.51,  $\alpha = 0.05$ ).



**Figura 10.** Diferencia total de color en exocarpio ( $\Delta E_{\text{exocarpio}}$ ) en la maduración de aguacate “Hass” a  $21 \pm 1$  °C durante 2, 4 y 6 días, almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, para los tratamientos temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C (□), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C (■) y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C (▨). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 2.51,  $\alpha = 0.05$ ).



Márquez *et al.* (2014) [ $a^*$  (-6 a 2),  $b^*$  (14 a 2) y  $L^*$  (36 a 25)] al estudiar el cambio de color de la piel durante el período posterior a la cosecha a 20 °C en aguacate “Hass”. Yahia (1993) observó que los frutos tropicales almacenados en atmósferas normales (aire) perdieron su color verde más rápido que los almacenados en atmósfera modificada. Este mismo efecto fue reportado para aguacate por Jordan y Smith *et al.* (1993), quienes atribuyeron el efecto de la composición de la atmósfera de almacenamiento en el color de la piel como una desincronización del proceso de maduración.

La variación de la diferencia total de color durante la maduración de los frutos se asocia visualmente con una disminución del color verde brillante a oscuro/negro, color característico de un aguacate maduro (Cox *et al.*, 2004). La presencia de clorofila y fitol, debido a la degradación de la clorofila b por acción enzimática, es probablemente responsable de las variaciones de color (Kader 1991; Yang *et al.*, 2009); así como, por la degradación de los carotenoides produciendo un aumento aparente de antocianinas (Ashton *et al.*, 2006).

### 3.5.1.3. Diferencia total de color en mesocarpio ( $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ )

La **Figura 11** muestra la diferencia total de color en el mesocarpio de frutos de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C.

No hubo diferencias ( $p > 0.05$ ) entre los tres tipos de almacenamiento de los frutos en el día 8. El color del mesocarpio de los frutos en refrigeración o atmósfera modificada no mostró diferencias durante los 32 días de almacenamiento. La diferencia total de color en mesocarpio fue de 4.2 a 6.3 para frutos en refrigeración o atmósfera modificada. A temperatura ambiente, el día 16 de almacenamiento fue el único día en que se observó un efecto debido al tipo de almacenamiento, mostrando una diferencia total de color de 16.6.

Estas diferencias pueden atribuirse a la maduración excesiva de los frutos en el día 16 de almacenamiento a temperatura ambiente, ya que mostraron coloraciones marrones en la pulpa; esto influyó principalmente en el comportamiento de los parámetros  $L^*$  y  $b^*$ . El parámetro  $b^*$  en el día 16 a temperatura ambiente fue de 30.5, mientras que en

el día 32 para refrigeración o atmósfera modificada, fue de 35.4 y 38.2, respectivamente.

Con respecto al parámetro de luminosidad, los frutos a temperatura ambiente en el día 16 mostraron la luminosidad más baja (66.8); por otro lado, para refrigeración y atmósfera modificada, en el día 32, se mantuvo alrededor de 80.

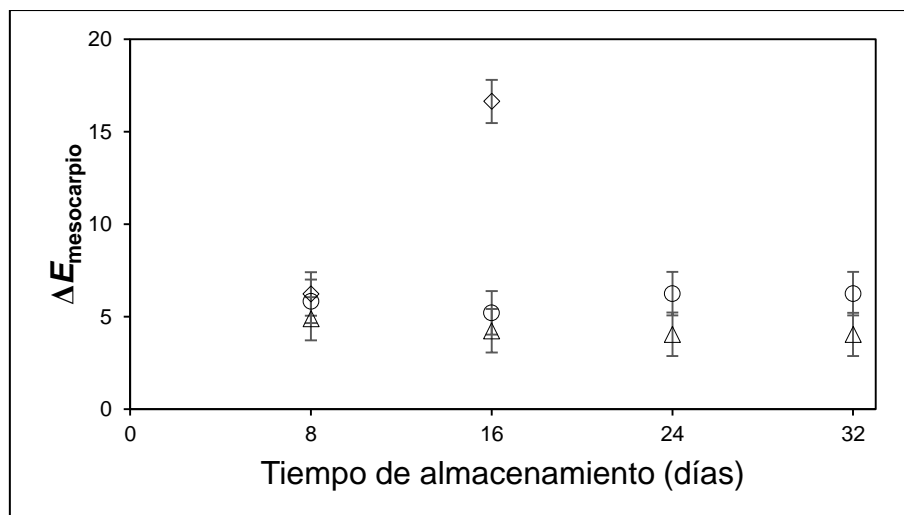
La **Figura 12** muestra la diferencia total de color en mesocarpio durante la maduración de frutos de aguacate “Hass” a  $21 \pm 1$  °C durante 2, 4 y 6 días, después del almacenamiento durante 8, 16, 24 y 32 días, a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. Los frutos a temperatura ambiente mostraron la mayor variación de color en el día 18.

La diferencia total de color para los frutos de aguacate a temperatura ambiente desde el día dos hasta el día 18 de maduración mostró un comportamiento ascendente con  $\Delta E$  de 4.8 a 20.3. Por el contrario, los frutos de aguacate en los días 34 y 36 de maduración almacenados en atmósfera modificada tenían un color más cercano ( $\Delta E$  de 5.2 y 7.9) a los frutos frescos que los del día 14 de maduración almacenados a temperatura ambiente ( $\Delta E$  de 11.7). En los días 12, 18, 20, 22, 34 y 36 de maduración, los frutos en refrigeración mostraron una mayor diferencia total de color (6.8 a 12.6) en comparación con aquellos en atmósfera modificada (3.5 a 8.0). Con respecto a la atmósfera modificada, los frutos con dos días de maduración (10, 18, 26 y 34 días) no mostraron un aumento en la diferencia total de color, el cual se encontró de 3.2 a 5.2. La evolución de las coordenadas de color es similar a la reportada por Márquez *et al.* (2014) [ $b^*$  (35 a 45) y  $L^*$  (62 a 82)] en aguacate “Hass” durante el período poscosecha a 20 °C. Además, es similar a lo reportado por Zapata *et al.* (2016) en aguacate “Hass”: inmaduro [ $b^*$  (37.4) y  $L^*$  (79.9)] y maduro [ $b^*$  (36.9) y  $L^*$  (79.6)].

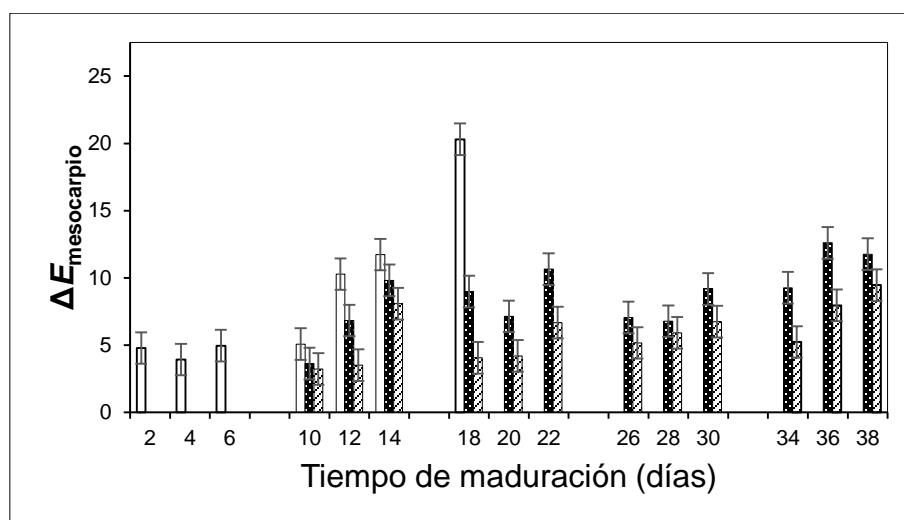
### 3.5.2. Análisis químicos

#### 3.5.2.1. pH

La **Figura 13** muestra el pH del aguacate “Hass” durante el almacenamiento (8, 16, 24 y 32 días) a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. El pH para los tres tipos de almacenamiento osciló entre 6.7 y 7.1.



**Figura 11.** Diferencia total de color en mesocarpio ( $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ ) de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C (◇), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C (○) y en atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C (Δ). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 2.35,  $\alpha = 0.05$ ).



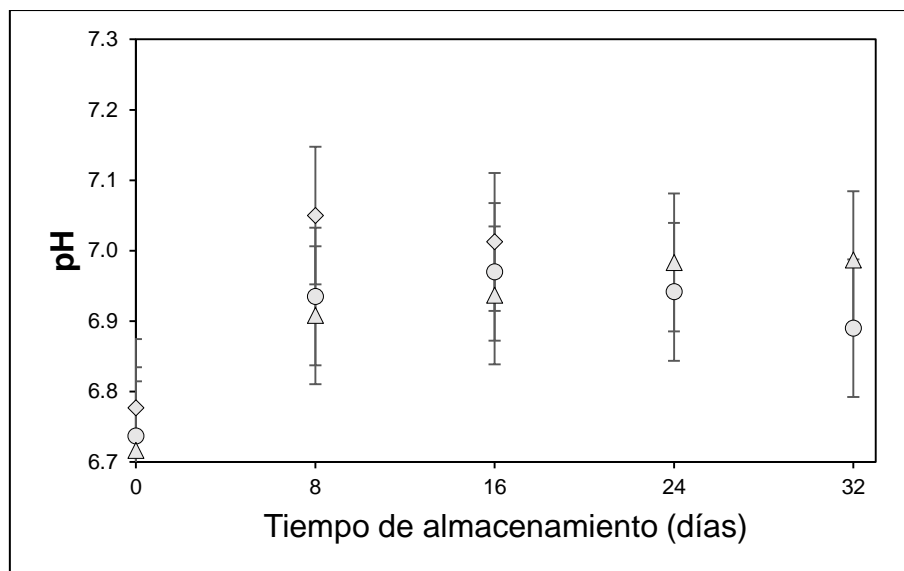
**Figura 12.** Diferencia total de color en mesocarpio ( $\Delta E_{\text{mesocarpio}}$ ) en la maduración de aguacate “Hass” a  $21 \pm 1$  °C durante 2, 4 y 6 días, almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, para los tratamientos temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C (□), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C (■) y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C (▨). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 2.35,  $\alpha = 0.05$ ).

En los frutos almacenados a temperatura ambiente hubo un aumento en el pH durante los primeros 8 días de almacenamiento. Aunque el pH de los frutos a temperatura ambiente, refrigeración y atmósfera modificada fue de 7.1, 6.9 y 6.9, respectivamente, no hubo diferencias significativas en el día 8. Posteriormente, el pH no fue diferente para los tres tipos de almacenamiento durante el período estudiado.

El **Cuadro 4** muestra el pH durante la maduración del aguacate "Hass" a  $21 \pm 1$  °C, evaluado durante 2, 4 y 6 días, después del almacenamiento durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente ( $21 \pm 1$  °C), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. Durante el tiempo de maduración de los frutos se encontró un pH de 6.6 a 7.1. Los frutos con cero días de almacenamiento más dos, cuatro y seis días de maduración son los frutos de control a temperatura ambiente.

El pH de los frutos con cero días de almacenamiento en refrigeración o atmósfera modificada no se muestra, ya que sería equivalente a cero días de almacenamiento (temperatura ambiente) para ambos tipos de almacenamiento. En el almacenamiento en atmósfera modificada, durante los días 12, 26 y 34 de maduración, se obtuvo un aumento de 0.3 unidades de pH, en comparación con el inicial, aunque no entre ellos. Por otro lado, el pH de los frutos almacenados en refrigeración durante los días 12 y 20 mostró un aumento similar al de la atmósfera modificada. De manera diferente, en los días 20, 22, 28, 30, 36 y 38 de maduración, el pH de los frutos para la atmósfera modificada se mantuvo constante. De manera similar, en refrigeración, los frutos no mostraron diferencias ( $p > 0.05$ ) en el pH durante los días 18, 22, 26, 28, 30, 34, 36 y 38 de maduración.

Russo *et al.* (2014) evaluaron el efecto de la atmósfera modificada sobre la actividad y la calidad del aguacate "Fuerte"; el efecto de la atmósfera tuvo una ligera influencia en la variación del pH, reportaron un pH de 6.4 a 7.1 durante los 25 días de evaluación. Oliveira *et al.* (1996) no encontraron diferencias de pH en aguacate "Fuerte" cubierto con cera de carnauba a temperatura ambiente y en refrigeración. Por otro lado, Hess *et al.* (1993) encontraron un pH de 6.3 a 6.9 para aguacate "Hass" en estado de madurez para consumo. Plaza *et al.* (2009) obtuvieron un pH inicial de 6.9 en aguacate "Hass" utilizado en el estudio de la influencia de la tecnología mínimamente procesada



**Figura 13.** pH de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C (◇), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C (○) y en atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C (Δ). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 0.21,  $\alpha = 0.05$ ).

en el contenido de ácidos grasos, esteroides y la actividad antioxidante. Generalmente, en los frutos durante la maduración se observa un aumento en el pH debido a la disminución de la acidez (Chitarra y Chitarra, 2005).

Astudillo-Ordoñez y Rodríguez (2018) estudiaron parámetros fisicoquímicos relacionados con la calidad de los alimentos y el pH reportado varió de 6.6 a 7.1. Además, observaron un aumento en el pH durante los primeros días de almacenamiento, así como una disminución después de la tercera semana de evaluación.

Este comportamiento también fue observado por Márquez *et al.* (2017) que informaron un aumento en el pH después de pasar los días posteriores a la cosecha en los frutos de aguacate "Hass". El pH para los frutos de dos municipios diferentes (Carmen de Viboral y El Retiro) varió de 6.4 a 6.6 y de 6.4 a 6.5, respectivamente. Esto concuerda con el reporte de Torres *et al.* (2013) quienes determinaron la influencia del estado de maduración en las características fisicoquímicas de los frutos tropicales (mango, maracuyá y papaya); encontraron que el pH aumentó ligeramente con el aumento en el estado de maduración.

Durante el proceso de maduración, una disminución del pH es característico; esto se atribuye a la degradación de la pared celular por la actividad enzimática (pectinmetilesterasa) en las cadenas de ácido galacturónico, lo que aumenta el número de grupos carboxilo libres (Anthon *et al.*, 2002). Posteriormente, la poligalacturonasa actúa sobre los segmentos que han sido desmetilados por la pectinmetilesterasa, aumentando los grupos carboxilo (Anthon *et al.*, 2002).

#### 3.5.2.2. Sólidos solubles totales (SST)

La **Figura 14** muestra el comportamiento de los SST del aguacate "Hass" durante el almacenamiento (8, 16, 24 y 32 días) a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. En el almacenamiento de aguacate a temperatura ambiente, refrigeración y atmósfera modificada, no se encontraron diferencias entre los tratamientos. Los sólidos solubles totales variaron de 6.3 a 6.9 °Brix.

**Cuadro 4.** pH en la maduración de aguacate “Hass” a  $21 \pm 1$  °C durante 2, 4 y 6 días, después de almacenado por 8, 16, 24 y 32 días en temperatura ambiente (*TA*) a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración (*R*) a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada (*AM*) a  $8 \pm 1$  °C.

| Tiempo de almacenamiento (días) | Tiempo de maduración (días) | Tipo de almacenamiento          |                                 |                                 |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                 |                             | <i>TA</i>                       | <i>R</i>                        | <i>AM</i>                       |
| 0                               | 0                           | $6.8 \pm 0.11$ <sup>a,b,c</sup> | $6.7 \pm 0.16$ <sup>a,b</sup>   | $6.7 \pm 0.13$ <sup>a,b</sup>   |
| 0                               | 2                           | $6.8 \pm 0.41$ <sup>a,b,c</sup> |                                 |                                 |
| 0                               | 4                           | $6.9 \pm 0.17$ <sup>b,c,d</sup> |                                 |                                 |
| 0                               | 6                           | $7.0 \pm 0.05$ <sup>c,d</sup>   |                                 |                                 |
| 8                               | 2                           | $7.1 \pm 0.15$ <sup>d</sup>     | $7.1 \pm 0.09$ <sup>d</sup>     | $7.1 \pm 0.09$ <sup>d</sup>     |
| 8                               | 4                           | $7.1 \pm 0.26$ <sup>d</sup>     | $7.1 \pm 0.14$ <sup>d</sup>     | $7.0 \pm 0.04$ <sup>c,d</sup>   |
| 8                               | 6                           | $7.1 \pm 0.17$ <sup>d</sup>     | $7.1 \pm 0.15$ <sup>d</sup>     | $6.9 \pm 0.18$ <sup>b,c,d</sup> |
| 16                              | 2                           | $6.8 \pm 0.15$ <sup>a,b,c</sup> | $6.9 \pm 0.07$ <sup>b,c,d</sup> | $6.9 \pm 0.17$ <sup>b,c,d</sup> |
| 16                              | 4                           |                                 | $7.0 \pm 0.10$ <sup>c,d</sup>   | $6.7 \pm 0.22$ <sup>a,b</sup>   |
| 16                              | 6                           |                                 | $6.9 \pm 0.14$ <sup>b,c,d</sup> | $6.7 \pm 0.12$ <sup>a,b</sup>   |
| 24                              | 2                           |                                 | $6.9 \pm 0.07$ <sup>b,c,d</sup> | $7.0 \pm 0.09$ <sup>c,d</sup>   |
| 24                              | 4                           |                                 | $6.8 \pm 0.05$ <sup>a,b,c</sup> | $6.7 \pm 0.07$ <sup>a,b</sup>   |
| 24                              | 6                           |                                 | $6.7 \pm 0.32$ <sup>a,b</sup>   | $6.6 \pm 0.33$ <sup>a</sup>     |
| 32                              | 2                           |                                 | $6.9 \pm 0.12$ <sup>b,c,d</sup> | $7.0 \pm 0.10$ <sup>c,d</sup>   |
| 32                              | 4                           |                                 | $6.9 \pm 0.13$ <sup>b,c,d</sup> | $6.7 \pm 0.20$ <sup>a,b</sup>   |
| 32                              | 6                           |                                 | $6.7 \pm 0.28$ <sup>a,b</sup>   | $6.6 \pm 0.15$ <sup>a</sup>     |

Letras diferentes indican diferencia significativa (LSD = 0.21,  $\alpha = 0.05$ ).

La **Figura 15** muestra los SST durante la maduración a  $21 \pm 1$  °C, evaluados durante 2, 4 y 6 días después del almacenamiento durante 8, 16, 24 y 32 días, a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C, refrigeración a  $8 \pm 1$  °C y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C.

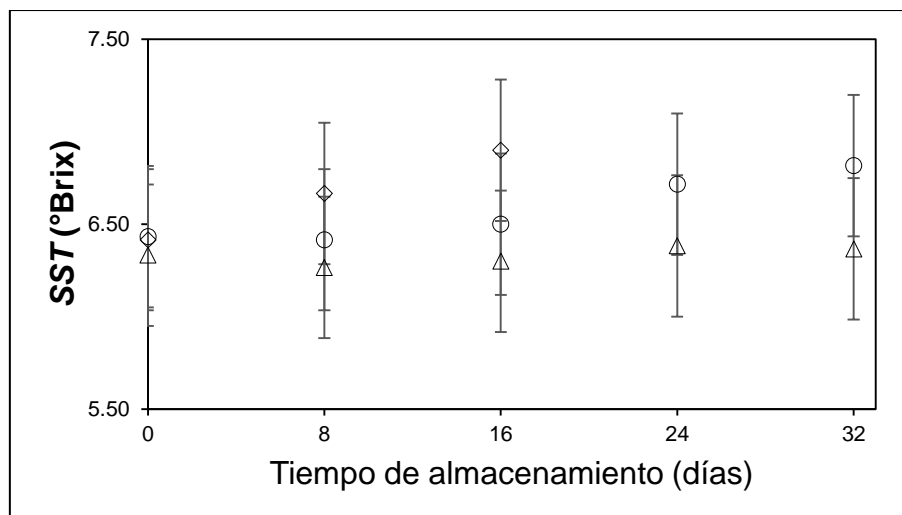
Los sólidos solubles totales oscilaron entre 5.3 y 7.7 °Brix. En el tratamiento a temperatura ambiente, en el día 12 de maduración, se observó un aumento en los sólidos solubles totales con respecto al día dos de maduración, es decir, de 6.5 a 7.7 °Brix.

Por otro lado, los SST de los frutos a temperatura ambiente en el día 12 de maduración (7.7 °Brix) fue diferente con respecto a los de refrigeración o atmósfera modificada en el día 38 de maduración, que mostró hasta ese día alrededor de 6 °Brix. Los SST de los frutos en atmósfera modificada no mostraron diferencias entre los días 14 y 38 de maduración, excepto los días 20, 22 y 30; el total de sólidos solubles varió de 5.3 a 6.8 °Brix, del día 14 al 38. Esto muestra el beneficio de usar refrigeración o atmósfera modificada como métodos de conservación.

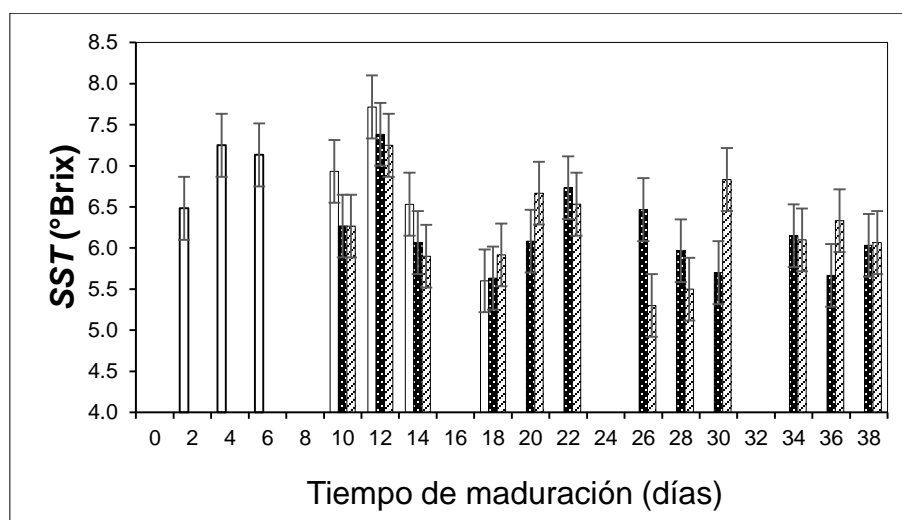
Russo *et al.* (2014) evaluaron el efecto de atmósferas modificadas en la actividad y calidad del aguacate "Fuerte"; el efecto de la atmósfera tuvo una ligera influencia en la variación de los sólidos solubles totales, reportaron, durante los 25 días de evaluación, un intervalo de 5.9 a 7.9 °Brix. Además, son similares a los reportados por Astudillo-Ordoñez y Rodríguez (2018) quienes encontraron SST de 5.1 a 7.3 °Brix; quienes observaron un aumento en los SST totales durante las primeras cuatro semanas.

Por otro lado, son similares al rango de 4.5 a 7.4 °Brix reportado por Buelvas *et al.* (2012). Vinha *et al.* (2013) caracterizaron los frutos de aguacate "Hass" de la región de Algarve; los sólidos solubles totales en pulpa fueron de 6.7 °Brix. Ramtahal *et al.* (2007) reportaron sólidos solubles totales aproximadamente de 9 °Brix en aguacate "Pollock". Los parámetros físicos y químicos en un fruto dependen tanto de factores internos (cultivar y estado de maduración) como de factores externos (condiciones ambientales y de almacenamiento) (Ahmed *et al.*, 2010). El aumento de los SST observado en este estudio puede explicarse porque durante la maduración, el almidón se hidroliza a ácidos orgánicos, pectinas solubles y azúcares simples, constituyendo este último la mayoría de los sólidos solubles totales. Los sólidos solubles totales disminuyen cuando las reservas de almidón se terminan como resultado de la respiración.





**Figura 14.** Sólidos solubles totales (SST) de aguacate “Hass” almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días a temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C (◊), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C (○) y en atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C (Δ). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa (LSD = 0.76 °Brix,  $\alpha = 0.05$ ).



**Figura 15.** Sólidos solubles totales (SST) en la maduración de aguacate “Hass” a  $21 \pm 1$  °C durante 2, 4 y 6 días, almacenado durante 8, 16, 24 y 32 días, para los tratamientos temperatura ambiente a  $21 \pm 1$  °C (□), refrigeración a  $8 \pm 1$  °C (■) y atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C (▨). Las barras verticales representan la diferencia mínima significativa. (LSD = 0.76 °Brix,  $\alpha = 0.05$ ).

### 3.6. CONCLUSIONES

El aguacate "Hass" almacenado en una atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C mostró una firmeza similar a la del fruto fresco durante los 32 días de almacenamiento. En contraste, los frutos almacenados a temperatura ambiente mostraron una marcada reducción en la firmeza durante los primeros días de almacenamiento. En el caso de la refrigeración, los aguacates mostraron una reducción considerable de la firmeza una vez transcurrido la mitad del período de almacenamiento. Los aguacates almacenados en refrigeración o atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C mostraron un color más similar al fresco (menor diferencia total de color) en exocarpio y mesocarpio, en comparación con los almacenados a temperatura ambiente. El tipo de almacenamiento no tuvo efecto sobre el pH y los sólidos solubles totales durante el almacenamiento durante 8, 16, 24 y 32 días.

Los parámetros de calidad fisicoquímicos evaluados en el aguacate "Hass" durante el almacenamiento indicaron que el uso de empaques AG Fresh® para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C es una alternativa viable en la conservación de estos frutos. Estas condiciones de almacenamiento permiten prolongar la vida útil del aguacate durante 32 días; período más prolongado que a temperatura ambiente (16 días), debido a la reducción de la firmeza y los cambios de color, propiedades que son referentes importantes de calidad.

### 3.7. LITERATURA CITADA

- Ahmed, D.M., F.M. Ahmed, A. El-Mongy, B. Abu-Aziz, and A.R. Yousef. 2007. Postharvest storage of Hass and Fuerte avocados under modified atmosphere conditions. *J. Appl. Sci. Res.* 3:267-274.
- Alonso, J., N. Howell, and W. Canet. 1997. Purification and characterization of two pectin methylesterase from persimmon (*Diospyros kaki*). *J. Sci. Food Agric.* 75:352-358.
- Anthon, G.E., Y. Sekine, N. Watanabe, and D.M. Barrett. 2002. Thermal inactivation of pectin methylesterase, polygalacturonase, and peroxidase in tomato juice. *J. Agr. Food Chem.* 50:6153-6159.
- Ashton, O.B., M. Wong, T.K. McGhie, R. Vather, Y. Wang, C. Requejo-Jackman, P. Ramankutty, and A.B. Woolf. 2006. Pigments in avocado tissue and oil. *J. Agr. Food Chem.* 4:10151-10158.
- Astudillo, C. and P. Rodríguez. 2018. Physicochemical parameters of avocado *Persea americana* Mill. cv. Hass (*Lauraceae*) produced in Antioquia (Colombia) for export. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria.* 19:383-392.
- Bill, M., D. Sivakumar, A.K. Thompson, and L. Korsten, 2014. Avocado fruit quality management during the postharvest supply chain. *Food Rev. Int.* 30:169-202.
- Buelvas Salgado, G.A., J.H. Patiño Gómez, and J.A. Cano Salazar. 2012. Evaluation of the Hass avocado oil extraction process (*Persea americana* Mill.) using enzymatic treatment. *Rev. Lasallista Investig.* 9:138-150.
- Castro-Benítez, M., L.P. Restrepo-Sánchez, and C.E. Narváez-Cuenca. 2005. Actividad de clorofilasa durante la maduración del banano bocadillo (*Musa acuminata*) (Simons). *Actual. Biol.* 27:151-158.
- Chitarra, M.I.F. and Chitarra AB. 2005. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. *Pesquisa Agropecuária e Manuseio*, ESAL/FAEPE, Lavras, Brazil.
- Cox, K.A., T.K. McGhie, A. White, and A.B. Woolf. 2004. Skin colour and pigment changes during ripening of 'Hass' avocado fruit. *Postharvest Biol. Tec.* 31:287-294.
- DeEll, J.R., R.K. Prange, H.W. and Peppelenbos. 2003. Postharvest physiology of fresh fruit and vegetables. *In: Chakraverty, A., A.S. Mujumdar, G.S. Raghavan, and H.S. Ramaswamy. (eds). Handbook of postharvest technology, cereals, fruit, vegetables, tea, and spices. Mercel Dekker Inc, New York USA. pp 455-483.*
- Deuchande, T., S.M. Carvalho, C. Larrigaudière, and M.W. Vasconcelos. 2015. Advances in refrigerated and controlled atmosphere storage of fruit and vegetables. *In: Gaspar, P.D. and P.D. da Silva. (eds). Handbook of Research on Advances and Applications in Refrigeration Systems and Technologies. IGI Global, University of Beira Interior, Portugal, pp 457-489*
- Dixon, J., D.B. Smith, and T.A. Elmsly. 2004. Fruit age, storage temperature and maturity effects on Hass avocado fruit quality and ripening. *New Zealand Avocado Growers. Assoc Annual Research Report 4: 47-53*
- Espinosa-Cruz, C.C., S. Valle-Guadarrama, M. Ybarra-Moncada, and M.T. Martínez-Damián. 2014. Postharvest behavior of 'Hass' avocado fruits affected by temperature and atmosphere modified with microperforated. *Rev. Fitotec. Mex.* 37:235-242.

- FAO/STAT. Food and agriculture organisation of the United Nations. Statistical. 2018. <http://www.fao.org/faostat/>. Accessed 08 November 2018
- García, J.A.O., J.A. Beltrán, and V.V. Valdivia. 2005. Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the postharvest behavior of the "Hass" avocado. *Rev. Fitotec. Mex.* 28:1-8.
- González, G., E.M. Yahia, and I. Higuera. 1990. Modified atmosphere packaging (MAP) of mango and avocado fruit. *Acta Hort.* 269:335-344.
- Hess, B., D. Ke, and A. Kader. 1993. Changes in intracellular pH, ATP, and glycolytic enzymes in "Hass" avocado in response to low O<sub>2</sub> and high CO<sub>2</sub> stresses. *In* Proceedings of the 6th International Controlled Atmosphere Research Conference. Cornell University. NRAES-71, Cornell University, Ithaca, New York, pp 1-9.
- Jordan, R. A., and L. G. Smith. 1993. The responses of avocado and mango to storage atmosphere composition. Proceedings of the 6th International Controlled Atmosphere Research Conference. NRAES, Ithaca, New York, pp 629-638.
- Kader, A.A. 1986. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruit and vegetables. *Food Technol.* 40:99-104.
- Kader, A.A. 1991. Índices de madurez, factores de calidad, normalización e inspección de productos hortícolas. *In*: Yahía, E. and C. Higuera. (eds). Postharvest physiology and technology of horticultural products. Limusa, México, D.F, pp. 49-58
- Latimer, G.W. and W. Horwitz. 2012. Official methods of analysis. Ed 19, Vol 2. AOAC International, Maryland, USA. pp 1500
- Lee, D.S., K.L. Yam, and L. Piergiovanni. 2010. Active and intelligent packaging. *Food Packaging Sci. Technol.* 1:445-473.
- Maarten, L.A., T.M. Hertog, S.E. Nicholson, and K. Whitmore. 2003. The effect of modified atmospheres on the rate of quality change in 'Hass' avocado. *Postharvest Biol Tec.* 29, 41-53.
- Maftoonazad, N., Y. Karimi, H.S. Ramaswamy, and S.O. Prasher. 2010. Artificial neural network modeling of hyper spectral radiometric data for quality changes associated with avocados during storage. *J Food. Process. Pres.* 35:432-446.
- Márquez, C.J., D.P. Yepes, L. Sanchez, and J.A. Osorio. 2014. Cambios físico-químicos del aguacate (*Persea americana* Mill. cv. "Hass") en poscosecha para dos municipios de Antioquia. *Temas Agrarios.* 19:34-49.
- Meir, S., D. Naiman, M. Akerman, J.Y. Hyman, G. Zauberman, and Y. Fuchs. 1997. Prolonged storage of Hass avocado fruit using modified atmosphere packaging. *Postharvest Biol. Tec.* 12: 51-60.
- Ochoa-Ascencio, S., M.L. Hertog, and B.M. Nicolaï. 2009. Modelling the transient effect of 1-MCP on 'Hass' avocado softening: A Mexican comparative study. *Postharvest Biol. Tec.* 51:62-72.
- Oliveira, M.A., C.H. Santos, C.M. Henrique, and J.D. Rodrigues. 2000. Waxes for postharvest conservation of avocado fruits cultivar Fuerte stored at room temperature. *Sci Agri.*; 57:777-780.
- Oms-Oliu, G., M.A. Rojas-Graü, L.A. González, P. Varela, R. Soliva-Fortuny, M.I. Hernando. 2010. A review: Recent approaches using chemical treatments to preserve quality of fresh-cut fruit. *Postharvest Biol. Tec.* 57:139-148.

- Ozdemir, F. and A. Topuz. 2004. Changes in dry matter, oil content and fatty acids composition of avocado during harvesting time and post-harvesting ripening period. *Food Chem.* 86:79-83.
- Pérez, K, J. Mercado, and H. Soto-Valdez. 2004. Note. Effect of storage temperature on the shelf life of Hass avocado (*Persea americana*). *Food Sci. Technol. Int.* 10:73-77.
- Plaza, L., C. Sánchez-Moreno, S. de Pascual-Teresa, B. de Ancos, and M.P. Cano. 2009. Fatty acids, sterols, and antioxidant activity in minimally processed avocados during refrigerated storage. *J. Agric. Food Chem.* 57:3204-3209.
- Ramtahal, G.A., J.O Akingbala, and G.S. Baccus-Taylor. 2007. Laboratory preparation and evaluation of Pollock variety avocado (*Persea americana* Mill) guacamole. *J Sci. Food Agr.* 87: 2068-2074.
- Revathy, B. and P. Surekha. 2002. Effect of modified atmosphere packaging and waxing on the storage behaviour of avocado fruit (*Persea americana* Mill). *J Food Technol.* 39:284-287.
- Roe, B. and J.H. Bruemmer. 1981. Changes in pectic substances and enzymes during ripening and storage of 'Keitt' mangos. *J. Food Sci.* 46:186-189.
- Russo, V.C., E.R. Daiuto, R.L. Vietes, and R.E. Smith. 2014. Postharvest parameters of the "Fuerte" avocado when refrigerated in different modified atmospheres. *J. Food Process Pres.* 38:2006-2013.
- Sandhya, K.V.K. 2010. Modified atmosphere packaging of fresh produce: current status and future needs. *Food Sci. Technol-Leb.* 43:381-392.
- Torres, R., E.J. Montes, O.A. Pérez, and R.D. Andrade. Relationship of color and state of maturity with the physicochemical properties of tropical fruits. *Inf Tecnol* 24:51-56.
- Valle-Guadarrama, S., M. Morales-Cabrera, C.B. Peña-Valdivia, B. Mora-Rodríguez, I. Alia-Tejacal, and J. Corrales-García. 2013. Oxidative/fermentative behavior in the flesh of "Hass" avocado fruit under natural and controlled atmosphere conditions. *Food Bioprocess Tech.* 6:272-282.
- Yahia, E.M. 1997. Modified/controlled atmospheres for avocado (*Persea americana* Mill.). *In: Kader A.A., (ed). Processing Vol. 3, Fruit other than Apples and Pears, Proc CA Res Conference. University of California, Davis, CA.* pp 97-103
- Yahia, E.M. 2003. Manejo poscosecha del aguacate (2a. Parte). Consultado: 01 Noviembre, 2018 from: <https://aproam.com/boletin32>
- Yahia, E.M. 2009. Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation and packaging of horticultural commodities. CRC Press. Boca Raton, USA.
- Yahia, E.M. and M.T. Hernandez. 1993. Tolerance and responses of harvested mango to insecticide low-oxygen atmosphere. *Hort. Sci.* 28:1031-1033.
- Yang, X.T., Z.Q. Zhang, D. Joyce, X.M. Huang, L.Y., and Xu, X.Q. Pang, 2009. Characterization of chlorophyll degradation in banana and plantain during ripening at high temperature. *Food Chem.* 114:383-390.
- Zafar, T. and J.S. Sidhu 2018. Avocado production, processing, and nutrition. *In: Siddiq, M. and M.A. Uebersax. (eds). Handbook of vegetables and vegetable processing. East Lansing. Wiley Blackwell, Michigan, USA.* pp 509-534.
- Zapata, J.E., A.M. Restrepo-Suárez, and L. Arias. 2016. Cinética de la deshidratación osmótica del aguacate (*Persea americana*), y optimización del color por medio de superficies de respuesta. *Inf. Tecnol.* 27:17-32.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

El modelo de cinética enzimática de Michaelis-Menten con inhibición competitiva permite modelar adecuadamente el comportamiento respiratorio del aguacate “Hass” bajo diferentes composiciones gaseosas utilizando un sistema cerrado a  $8 \pm 1$  °C.

Las estimaciones del consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub> se ajustaron de manera apropiada a las experimentales. La permeabilidad y la cantidad total de gas difundido (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) a través de la película para atmósfera modificada se estimaron satisfactoriamente a partir de las leyes de difusión de Fick.

El modelo matemático a partir de los balances de masa en estado no estacionario y de las velocidades de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>, descrito con un modelo de inhibición competitiva, permitió predecir en forma adecuada el proceso de respiración del aguacate “Hass” almacenado en un empaque para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C. Las concentraciones de gas dentro del empaque se simularon con permeabilidades propuestas para que el sistema alcance concentraciones estables de 10.0 %mol O<sub>2</sub> y 9.5 %mol CO<sub>2</sub> después de 240 h de almacenamiento, lo que podría mejorar la atmósfera interna y extender la vida útil del aguacate “Hass” cuando se almacena en un empaque para atmósfera modificada a  $8 \pm 1$  °C.

Los aguacates almacenados en refrigeración y atmósfera modificada con refrigeración a  $8 \pm 1$  °C mostraron un color más parecido al fresco (menor diferencia total de color) en exocarpio y mesocarpio, con respecto a los almacenados a temperatura ambiente. El tipo de almacenamiento no ejerció efecto sobre el pH y los sólidos solubles totales. Los parámetros fisicoquímicos de calidad evaluados en aguacate “Hass” durante el almacenamiento indicaron que el empleo de un empaque AG Fresh® para atmósfera modificada combinado con refrigeración a  $8 \pm 1$  °C es una alternativa viable en la conservación de estos frutos. Estas condiciones de almacenamiento permiten prolongar la vida útil del aguacate durante 32 días; periodo superior al obtenido con temperatura ambiente (16 días), debido a que se reducen los cambios en firmeza y color, características que constituyen referentes importantes de la calidad.

## CAPITULO 5. LITERATURA CITADA

- Ahmed, D., F. Ahmed, A. El-Mongy, B. Abu-Aziz, and A. Yousef. 2007. Postharvest storage of Hass and Fuerte avocados under modified atmosphere conditions. *J. Appl. Sci. Res.* 3: 267-274.
- Alexander, L., and D. Grierson. 2002. Ethylene biosynthesis and action in tomato: a model for climacteric fruit ripening. *J Exp Bot.* 53:2039-55.
- Allende, A., Y. Luo, J. McEvoy, F. Artés, and C. Wang. 2004. Microbial and quality changes in minimally processed baby spinach leaves stored under super atmospheric oxygen and modified atmosphere conditions. *Postharvest Biol. Technol.* 33:51-59.
- Andrich, G., A. Zinnai, S. Balzini, S. Silvestri, and R. Fiorentini. 1998. Aerobic respiration rate of golden delicious apples as a function of temperature and pO<sub>2</sub>. *Postharvest Biol. Technol.* 14:1–9.
- Andrich, G., R. Fiorentini, A. Tuci, A. Zinnai, and G. Sommovigo. 1991. A tentative model to describe respiration of stored apples. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 116, 478–481.
- Artés, F., P.A. Gómez, and F. Artés-Hernández. 2006. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Ste. Postharvest Rev.* 5:1-13.
- BANCOMEXT. 2014. Exportación para aguacate. [www.bancomext.com](http://www.bancomext.com). (Consultado: Noviembre 2014).
- Barmore, C. 1977. Avocado fruit maturity. *Proceedings of the First International Tropical Fruit Short Course: The Avocado.* 103-109.
- Barry, C.S., and J.J. Giovannoni. 2007. Ethylene and fruit ripening. *J. Plant Growth Regul.* 26:143–159.
- Barrientos, P.A.F., and L.L. López. 2002. Historia y genética del aguacate. Memoria 2002 de la Fundación Salvador Sánchez Colín. Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Aguacate en el Estado de México. Coatepec de Harinas, México. 100-121 pp.
- Baskaran, R., and S. Puyed. 2002. Effect of Modified Atmosphere Packaging and Waxing on the Storage Behaviour of Avocado Fruits (*Persea americana* Mill). *J Food Sci Technol.* 39:284-287.
- Bean, R.C. 1956. Biochemical reactions of Avocados in relation to standards of maturity. *Calif. Avocado Soc.* 40:148-151
- Beaudry, R. 2000. Responses of horticultural commodities to low O<sub>2</sub>: Limits to the expanded use of modified atmosphere packaging. *HortTechnology.* 10:491-500
- Blakey, R.J. 2011. Management of avocado postharvest physiology. Dissertation, School of Horticultural Science, University of Natal, Pietermaritzburg.
- Bleecker, A., and S.E. Patterson. 1997. Last exit: Senescence, abscission, and meristem arrest in Arabidopsis. *Plant Cell.* 9:1169-1179
- Bleecker, A.B., and H. Kende. 2000. Ethylene: a gaseous signal molecule in plants. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 16:1-18
- Bower, J.P. 2005. Resolving long distance shipping disorders in 'Hass' avocados, New Zealand and Australia Avocado Growers' Conference, Session 6, Tauranga, New Zealand.

- Brecht, J.K. 1994. Physiology of lightly processed fruits and vegetables. *HortScience*. 30:18-22.
- Brody, A.L. 2003. Modified atmosphere packaging. In: Dennis, R. (ed). *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. Taylor & Francis. pp 666-670
- Burg, S.P., and K. Thimann. 1960. The physiology of ethylene formation in apples. Department of Biology. Harvard University.
- Burg, S.P., and E. Burg. 1962. Role of ethylene in fruit ripening. *Plant Physiol*. 37:179-189.
- Cameron, A.C., R.M. Beaudry, N.H. Banks, and M.V. Yelanich. 1994. Modified atmosphere packaging of blueberry fruit: modeling respiration and package oxygen partial pressures as a function of temperature. *J. Am. Soc. Hortic. Sci*. 119: 534–539.
- Cameron, A.C., W. Boylan-Pett, and J. Lee. 1989. Design of modified atmosphere packaging systems: modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits. *J. Food Sci*. 54:1413.
- Chevillotte, P. 1973. Relation between the reaction cytochrome oxidase-oxygen and oxygen uptake in cells in vivo. The role of diffusion. *J. Theor. Biol*. 39: 277–295
- Dadzie, B.K., N.H. Banks, D.J. Cleland, and E.W. Hewett. 1996. Changes in respiration and ethylene production of apples in response to internal and external oxygen partial pressures. *Postharvest Biol. Technol*. 9:297–309.
- Daniels, J.A., R. Krishnamurti, and S.S.H. Rizvi. 1985. A review of effects of CO<sub>2</sub> on microbial growth and food quality. *J. Food Prot*. 48:532-537
- Das, H. 2005. *Food Processing Operations Analysis*. New Delhi. Asian Books Pvt., Ltd. pp 406
- Davenport, J.B., and S.C. Ellis. 1959. Chemical changes during growth and storage of the avocado fruit. *Aust. J. Biol. Sci*. 12:445-454.
- DeEll, J.R., and P.M. Toivonen. 1999. Chlorophyll fluorescence as an indicator of physiological changes in cold-stored broccoli after transfer to room temperature. *Int J Food Sci*. 64:501–503.
- Del Nobile, M.E., F. Licciardello, C. Scrocco, G. Muratore, and M. Zappa. 2007. Design of plastic packages for minimally processed fruits. *J Food Sci Eng*. 79: 217-224
- Del Valle, J.M., and Palma, M.T. 2002. *Preservación II Atmósferas controladas y modificadas*. Temas en tecnología de los alimentos. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. C.D. de México, México: Instituto Politécnico Nacional. pp 89-103
- Del-Valle, V., P. Hernandez-Munoz, R. Catala, and R. Gavara. 2009. Optimization of an equilibrium modified atmosphere packaging (MAP) for minimally processed mandarin segments. *J Food Sci Eng*. 91:474-481
- Dixon, J., D.B. Smith, and T.A. Elmsly. 2004. Fruit age, storage temperature and maturity effects on Hass avocado fruit quality and ripening. *New Zealand Avocado Growers. Assoc Annual Research Report* 4: 47-53
- Dopico, B., A.L. Lowe, I.D. Wilson, C. Merodio, and D. Grierson. 1991. Cloning and characterization of avocado fruit mRNAs and their expression during ripening and low-temperature storage. *Plant Mol. Biol*. 21:437-449.
- Esteban-Zapata, J. A. Salvador-Ochoa, E. Jorge-Ceja, F. Andrés-Gómez y A. Felipe-Ríos. 2014. *Manual Técnico de Poscosecha de Aguacate Hass*. Corporación de Investigaciones Biológicas. CIB. ISBN:978-9588843-11-7. pp 66.



- Espinosa-Cruz, C.C., S. Valle-Guadarrama, M. Ybarra-Moncada, and M.T. Martínez-Damián. 2014. Postharvest behavior of 'Hass' avocado fruits affected by temperature and atmosphere modified with microperforated. *Rev. Fitotec. Mex.* 37:235-242.
- Exama, A., J. Arul, R.W. Lencki, L.Z. Lee, and C. Toupin. 1993. Suitability of plastic films for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Int J Food Sci.* 58:1365-1370
- FAOSTAT. 2018. Faostat database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Consultado: Septiembre 2019).
- Farber, J.M. 1991. Microbiological aspect of modified-atmosphere packaging technology-A review. *J Food Prot.* 54:58-70
- Feng, X., Apelbaum, A., A.C. Sisler, and R. Goren. 2000. Control of ethylene responses in avocado fruit with 1-methylcyclopropene. *Postharv Biol Technol.* 20:143–150.
- Fernández-Trujillo, J.P., J.M. Obando-Ulloa, J.A. Martínez, E. Moreno, J. García-Mas, and A.J. Monforte. 2008. Climacteric and non-climacteric behavior in melon fruit 2. Linking climacteric pattern and main postharvest disorders and decay in a set of near isogenic lines. *Postharv Biol Technol.* 50:125-134
- Fidler, J.C., and C.J. North. 1967. The effect of conditions of storage on the respiration of apples, I. The effects of temperature and concentrations of carbon dioxide and oxygen on the production of carbon dioxide and uptake of oxygen. *J. Hortic. Sci.* 42:189-206
- Flitsanov, U., A. Mizrach, A. Liberzon, M. Akerman, and G. Zauberman. 2000. Measurement of avocado softening at various temperatures using ultrasound. *Postharv Biol Technol.* 20:279–286.
- Fonseca, S.C., F.A.R. Oliveira, and J.K. Brecht. 2002. Modelling of respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *J Food Sci Eng.* 52:99-119
- Gomes, M. H., R. M. Beaudry, D. P. Almeida, and F. X. Malcata. 2010. Modelling respiration of packaged fresh-cut 'Rocha' pear as affected by oxygen concentration and temperature. *J. Food Eng.* 96: 74-79.
- Gorris, L., and B. Tauscher. 1999. Quality and safety aspects of novel minimal processing technology. *In: Oliveira, F.A.R., J.C. Oliveira. (eds) Processing of Foods: Quality Optimization and Process Assessment.* Boca Raton, US, CRC Press. pp 325-339.
- González, G., E.M. Yahia, and I. Higuera. 1990. Modified atmosphere packaging (MAP) of mango and avocado fruit. *Acta Hortic.* 269:335-344.
- Gross, K., C.Y. Wang, and M.E. Saltveit. 2002. The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks. USDA Agriculture Handbook 66. Disponible en: <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/index.html>.
- Grumet, R., J.F. Fobes, and R. C. Herner. 1961. Ripening behavior of wild tomato species. *Plant Physiol.* 68:1428-32.
- Geysen, S., B. Verlinden, A. Conesa, and B. Nicolai. 2005. Modelling respiration of strawberry (cv. Elsanta) as a function of temperature, carbon dioxide, low and superatmospheric oxygen concentration. *Frutic.* 5: 12-16.

- Haggar, P.E., D.S. Lee, and K.L. Yam. 1992. Application of an enzyme kinetics based respiration model to closed system experiments for fresh produce. *J Food Process Eng.* 15:143–157.
- Hayakawa, K., Y.S. Henig, and S.G. Gilbert. 1975. Formulae for predicting gas exchange of fresh produce in polymeric film package. *J. Food Sci.* 40:186-191
- Henig, Y.S. and S.G. Gilbert. 1975. Computer analysis of the variables affecting respiration and quality of produce packaged in polymeric films. *J. Food Sci.* 40: 1033–1035.
- Hotchkiss, J.H. 1989. Microbiological hazards of control/modified atmosphere food packaging. *J Assoc Food Drug Off.* 53:41-49
- Irtwange, S.V. 2006. Application of modified atmosphere packaging and related technology in postharvest handling of fresh fruits and vegetables. *Agricultural Engineering International* 4:1-9
- Jacxsens, L., F. Devlieghere, and J. Debevere. 1999. Validation of a systematic approach to design equilibrium modified atmosphere packages for fresh-cut produce. *Lebensm. Wiss. Technol.* 32:425-432
- Johnson, K.L., M.J. Gidley, A. Bacic, and M.S. Doblin. 2017. Cell wall biomechanics: a tractable challenge in manipulating plant cell walls 'fit for purpose'. *Curr. Opin. Biotechnol.* 49, 163-171.
- Joles, D.W., A.C. Cameron, A. Shirazi, P.D. Petracek, and R.M. Beaudry. 1994. Modified atmosphere packaging of 'Heritage' red raspberry fruit: respiratory response to reduced oxygen, enhanced carbon dioxide and temperature. *Int. J. Hortic. Sci.* 119:540–545.
- Jurin, V. and M. Karel. 1963. Studies on control of respiration of McIntosh apples by packaging methods. *Food Technol.* 17:782-786.
- Kader, A.A., and R.S. Rolle. 2004. The role of post-harvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce. *FAO*:13.
- Kader, A.A., D. Zagory, and E.L. Kerbel. 1989. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 28:1–30.
- Kader, A.A., y M.E. Saltveit. 2003. Respiration and gas exchange. *Postharv. Physiol. Pathol. Veget.* 2:7-29.
- Ke, D., and M.E. Saltveit. 1989. Carbon dioxide-induced brown stain development as related to phenolic metabolism in iceberg lettuce. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 114:789-794
- Kritchevsky, D.S., A. Tepper, S. Wright, S.K Czarnecki, T.A. Wilson, and R.J. Nicolosi. 2003. Cholesterol vehicle in experimental atherosclerosis 24: avocado oil. *J. Amer. College of Nutrition.* 22:52-55
- Lakakul, R., R.M. Beaudry, and R.J. Hernandez. 1999. Modeling respiration of apple slices in modified-atmosphere packages. *Int J Food Sci.* 64:105–110.
- Lee, D., P. Haggar, J. Lee, and K. Yam. 1991. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. *nt J Food Sci.* 56: 1580-1585.
- Lee, D.S., Y. Song, and K.L. Yam. 1996. Application of an enzyme kinetics based respiration model to permeable system experiment of fresh produce. *J Food Sci Eng.* 27:297–310.
- Lee, S. 1981. A review and background of the avocado maturity standard. *California Avocado Society.* 65:101-109.

- Lee, S.K., R.E Young, P.M. Schiffman, and C.W. Coggins. 1983. Maturity studies of avocado fruit based on picking dates and dry weight. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108:390-394
- Lu, S.M. 2009. Effects of bactericides and modified atmosphere packaging on shelf-life of Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*). *Lebensm. Wiss. Technol.* 42:286-291
- Mahajan, P.V. 2001. Studies on control atmosphere storage for apple and litchi using liquid nitrogen. Unpublished PhD thesis, Department of Agriculture and Food Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India, 197 pp
- Mahajan, P.V., F.A.R. Oliveira, J.C. Montanez, and J. Frias. 2007. Development of user-friendly software for design of modified atmosphere packaging for fresh and fresh-cut produce. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 8:84-92
- Maldonado-Torres, R., M.E. Álvarez-Sánchez, G. Almaguer-Vargas, A.F. Barrientos-Prieto, and R. García-Mateos. 2007. Estándares Nutrimientales para Aguacatero "Hass". *Rev Chapingo Ser Hortic.* 13:103-108.
- Maneerat, C., A. Tongta, S. Kanlayanarat, and C. Wongs-Aree. 1997. A transient model to predict O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations in modified atmosphere packaging of bananas at various temperatures. *In: Gorny J.R. (ed.), Proceedings of the 7th international controlled atmosphere research conference: Vol. 5. Davis, CA, USA. pp 191–197*
- Mangaraj, S., and T.K. Goswami. 2009. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables for extending shelf-life-A review. *Fresh produce.* 3:1-31.
- Mangaraj, S., T.K. Goswami, and P.V. Mahajan. 2009. Application of plastic films in modified atmosphere packaging of fruits and vegetables – a review. *Food Eng rev.* 1:133–158
- Mangaraj, S., and T.K. Goswami. 2011. Modeling of Respiration Rate of Litchi Fruit under Aerobic Conditions. *Food Bioproc Tech.* 4,272–281.
- Martínez-Romero, D., M. Serrano, F. Guillen, S. Castillo, and D. Valero. 2007. Tools to maintain postharvest fruit and vegetable quality through the inhibition of ethylene action: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 47:543-560
- Mathooco, F.M. 1996. Regulation of respiratory metabolism in fruits and vegetables by carbon dioxide. *Postharvest Biol. Technol.* 9:247-264.
- Maarten, L.A., T.M. Hertog, S.E. Nicholson, and K. Whitmore. 2003. The effect of modified atmospheres on the rate of quality change in 'Hass' avocado. *Postharvest Biol Tec.* 29, 41-53.
- McLaughlin, C.P., and D. O'Beirne. 1999. Respiration rate of a dry coleslaw mix as affected by storage temperature and respiratory gas concentrations. *Int J Food Sci.* 64:116–119.
- Meir, S., D. Naiman, M. Akerman, J.Y. Hyman, G. Zauberman, and Y. Fuchs. 1997. Prolonged storage of Hass avocado fruit using modified atmosphere packaging. *Postharvest Biol. Tec.* 12: 51-60.
- Mizrach, A., N. Galili, and G. Rosenhouse. 1991. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Trans ASAE.* 34:2135–2138.
- Millar, A. H., J. Whelan, K. L. Soole, and D. A. Day. 2011. Organization and regulation of mitochondrial respiration in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 62: 79-104.

- Montanez, J.C., F.A.S. Rodriguez, P.V. Mahajan, and J.M. Frias. 2010. Modelling the effect of gas composition on the gas exchange rate in perforation-mediated modified atmosphere packaging. *J Food Eng.* 96:348–355
- Naveh, E., M.J Werman, V. Sabo, and I. Neeman. 2002. Defatted avocado pulp reduces body weight and total hepatic fat but increases plasma cholesterol in male rats fed diets with cholesterol. *J Nutr.* 132:2015–2018.
- Newett, S.D.E., J. H. Crandy, and C. F. Balerdi. 2002. Cultivars and rootstocks. *In: Whiley, A.W., B. Schaffer, and B.N. Wolstenholme. (eds.). Avocado: botany, production and uses.* CAB Publishing. pp 161-187.
- Ortiz, M., A.L. Dorantes, M.J. Galdnez, and E. Cárdenas. 2004. Effect of a novel oil extraction method on avocado (*Persea americana* Mill.) pulp microstructure. *Plant Foods Hum Nutr.* 59:11-14.
- Oliveira, F., M. Sousa-Gallagher, P. Mahajan, and J. Teixeira. 2012. Development of shelf-life kinetic model for modified atmosphere packaging of fresh sliced mushrooms. *J. Food Eng.* 111: 466-473.
- Paul, D.R., and R. Clarke. 2002. Modeling of modified atmosphere packaging based on designs with a membrane and perforations. *J Memb Sci.* 208:269-283
- Peppelenbos, H.W. and J. Van't Leven. 1996. Evaluation of four types of inhibition for modelling the influence of carbondioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 7:27–40.
- Peppelenbos, H.W., J. Van't Leven, B.H. Van Zwol, and L.M.M. Tijskens. 1993. The influence of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on the quality of fresh mushrooms. *In* Blanpied, G.D., J.A. Barstch, J.R. Hicks. (eds.), *Proceedings of the 6th international controlled atmosphere research conference: Vol. 1.* Ithaca, NY, USA. pp 746–758
- Pérez-Álvarez, S., G. Ávila-Quezada, and O. Coto-Arbelo. 2015. El aguacatero (*Persea americana* Mill). *Cultivos Tropicales.* 36:111-123.
- Pérez, K., J. Mercado, and H. Soto-Valdez. 2004. Effect of Storage Temperature on the Shelf Life of Hass Avocado (*Persea americana*). *Int J Food Sci Technol.* 10: 273-277.
- Phillips, C. 1996. Modified atmosphere packaging and its effects on the microbiological quality and safety of produce. *Int J Food Sci Technol.* 31:28-31.
- Prasad, M., and R.P. Singh. 1994. Development of modified atmosphere packaging system for fruit storage through gas barrier polymeric films. *In: Bharadwaj, M. (ed) Polymer Science – Recent Advances.* New Delhi, Allied Publishers Ltd. 2:971-987
- Ranney, C., G. Gillette, A. Brydon, S. McIntyre, O. Rivers, and C.A. Vasquez. 1992. Physiological maturity and percent dry matter in California avocado. *Proc. of Second World Avocado Congress.* 379-385.
- Ratti, C., G.S.V. Raghavan, and Y. Gariepy. 1996. Respiration rate model and modified atmosphere packaging of fresh cauliflower. *J Food Sci Eng.* 28:297–306.
- Rediers, H., M. Claesa, L. Peeters, and K.A. Willems. 2009. Evaluation of the cold chain of fresh-cut endive from farmer to plate. *Postharvest Biol. Technol.* 51: 257-262
- Renault, P., M. Souty, and Y. Chambroy. 1994. Gas exchange in modified atmosphere packaging. 1. A new theoretical approach for micro-perforated packs. *International. J Food Sci Tech.* 29:365–378.

- Rennie, T.J., and S. Tavoularis. 2009. Perforation-mediated Modified Atmosphere Packaging. Part II. Implementation and Numerical Solution of a Mathematical Model. *Postharvest Biol. Technol.* 51:10-20
- Rodríguez, A.N. y P.P. Sánchez. 2005. Especies de frutales cultivadas en Cuba en la Agricultura Urbana. 3ra edición. La Habana. pp 112.
- Rojas-Graü, M.A., Oms-Oliu, G., Soliva-Fortuny, R., and Martín-Belloso, O.. 2009. The Use of Packaging Techniques to Maintain Freshness in Fresh-cut Fruits and Vegetables: a Review. *International. J Food Sci Technol.* 44:875-889.
- SAGARPA. Subsecretaría de Fomento de Agronegocios. 2011. Monografía de cultivos. Aguacate. pp 1-10. (Consultado: 31 de octubre).
- Saltveit, M.E. 2005. Commercial Storage of Fruits, Vegetables and Florist And Nursery Crops, *Postharvest Technology Centre RIC, Department of Plant Science, University of California, USA.* pp 485
- Schroeder, C.A. 1953. Growth and development of Fuerte avocado fruit. *Horttechnology.* 61:103-109.
- Seymour, G.B., and G.A. Tucker. 1993. Avocado. *In: Biochemistry of Fruit Ripening.* Seymour G.B. (ed). London, Chapman & Hall. pp. 53–76.
- Shakuntala, M.N, M. and Shadakshraswami. 2006. *Foods: Facts and Principles*, New Age International Publishers Pvt. Ltd., New Delhi. pp 540
- SIAP. 2019. Sagarpa database. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> (Consultado: Septiembre 2019).
- Sivakumar, D., E. Arrebola, and L. Korsten. 2008. Postharvest decay control and quality retention in litchi (cv. McLean's Red) by combined application of modified atmosphere packaging and antimicrobial agents. *J Crop Prot.* 27:1208- 1214
- Smith, S., J. Geeson, and J. Stow. 1987. Production of modified atmosphere in deciduous fruits by the use of films and coatings. *J. Hortic Sci.* 22:772-776
- Smyth, A.B., J. Song, and A.C. Cameron. 1998. Modified atmosphere packaged cut iceberg lettuce: effect of temperature and O<sub>2</sub> partial pressure on respiration and quality. *J. Agric. Food Chem.*46:4556–4562.
- Song, Y., H.K. Kim, and K.L. Yam. 1992. Respiration rate of blueberry in modified atmosphere at various temperatures. *J. Hortic Sci.* 117:925–929.
- Talasila, P.C., A.C. Cameron, and D.W. Joles. 1994. Frequency distribution of steady-state oxygen partial pressures in modified atmosphere packages of cut broccoli. *J. Hortic Sci.* 119: 556–562.
- Techavises, N., and Y. Hikida. 2008. Development of a mathematical model for simulating gas and water vapor exchanges in modified atmosphere packaging with macroscopic perforations. *J Food Eng.* 85:94-104
- Vanalcocha, R.J. 1999. *Procesos de conservación de los alimentos.* Zaragoza, España, Mundiprensa. pp 76-83.
- Veeraju, P. and M. Karel. 1966. Controlling atmosphere in a fresh-fruit package. *Modern Pkg.* 40: 168-70
- Vekiari, S.A., S.I. Papadopoulou, and A. Krystallis. 2004. Variation in the composition of Cretan avocado cultivars during ripening. *J. Sci. Food Agric.* 84:485–492.
- Watkins, C. 2000. Responses of horticultural commodities to high CO<sub>2</sub> as related to modified atmosphere packaging. *Horttechnology.*10:501- 506.

- Williams, L.O. 1977. The avocados, a synopsis of the genus *Persea*, subg. *Persea*. *Econ. Bot.* 31:315-320.
- Wills, R., B. McGlasson, D. Graham, and D. Joyce. 1999. Introducción a la fisiología y manipulación de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. 2ª edición. Zaragoza, España, Acribia. pp 240.
- Xiao, L., and M. Kiyota. 2000. Design of a modified atmosphere package for retaining freshness of avocado (*Persea americana*) fruits. *Environ. Control in Biol.* 38: 157-164.
- Yahia, E. 1997. Modified/controlled atmospheres for avocado (*Persea Americana* Mill.). In *Proceedings*, Vol. 3, pp: 13-18. Davis: University of California. Yahia, E.M. 2009. Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation and packaging of horticultural commodities. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Yang, CC., and M.S. Chinnan. 1988. Modeling the effect of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on respiration and quality of stored tomatoes. *Transactions of the ASAE.* 31: 920-925
- Zafar T., and J.S. Sidhu. 2018. Avocado Production, Processing, and Nutrition. In *Handbook of Vegetables & Vegetable Processing*. USA, WileyBlackwell. pp 525-543.
- Zagory, D., and A.A. Kader. 1988. Modified atmosphere packaging of fresh produce. *Food Technol.* 42:70.
- Zauberman. G., M. Schiffmann-Nadel, and U. Yanko. 1977. The Response of Avocado Fruits to Different Storage Temperatures. *Hortscience.* 12:353-354.



**EDITORIAL**

*"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"*

**DRA. SOILA MARIBEL GAXIOLA CAMACHO**  
Presente


Por este conducto comunico a usted que la contribución con clave: 18-362 intitulada: **PERMEABILITY ESTIMATION OF A MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGE FOR "HASS" AVOCADO STORAGE**, cuyos autores son: Yessica Vázquez-López, José Caro-Corrales, Soila Gaxiola-Camacho, Rosalina Iribesalazar, Marco Carrasco-Escalante, Jesús Portillo-Loera, Miguel Rodríguez-Gaxiola, se encuentra aceptada para publicación.

*Sergio S. González Muñoz, Ph.D.*  
Director de Agrociencia

SSGM/yfm

 José Caro-Corrales

### HST-191029-06 / Research Report / Postharvest Technology

 Physicochemical Parameters for "Hass" Avocado Stored in AG Fresh® Modified Atmosphere Package

Status: Review / Peer-review | Submission stage: 1st stage

Date of submission: 2019-10-27 | Date of received: 2019-10-29 | Date of revised: (Undefined) | Date of completed: (Undefined)




 [View the submitted manuscript](#)

Basic info

Manuscript information

Attached file

Author

| No. | Type                      | Author  | 학회원   | E-mail                     | Affiliation/Department          | Detail info                 |
|-----|---------------------------|---|---|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 1   | Corresponding author      | <a href="#">CARO-CORRALES, José</a><br>0000-0003-1496-0507    |  | josecaro@uas.edu.mx        | Universidad Autónoma de Sinaloa | <a href="#">Detail info</a> |
| 2   | First author(Lead author) | <a href="#">VÁZQUEZ-LÓPEZ, Yessica</a><br>0000-0002-8874-0235 |  | yessica.vazquez@uas.edu.mx | Universidad Autónoma de Sinaloa | <a href="#">Detail info</a> |
| 3   | Co-author                 | <a href="#">GAXIOLA-CAMACHO, Soila</a><br>0000-0002-5078-7636 |  | soilagaxiola@uas.edu.mx    | Universidad Autónoma de Sinaloa | <a href="#">Detail info</a> |