

# MODELADO DE UNA ATMÓSFERA MODIFICADA PARA CONSERVAR FRUTOS DE TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa*)

## MODELING OF A MODIFIED ATMOSPHERE TO PRESERVE HUSK TOMATO (*Physalis ixocarpa* BROTT.) FRUITS

Salvador Valle-Guadarrama\*; Adalberto Gómez-Cruz; Fabiola Cruz-Cruz;  
Armando Chan-Chi

Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México. C. P. 56230, MÉXICO.  
Corre-e: svalle77@gmail.com (\*Autor responsable)

### RESUMEN

Las atmósferas modificadas son sistemas de conservación de productos hortofrutícolas en fresco que usan películas plásticas como envase. Su principal problema es el desarrollo de un metabolismo fermentativo originado por una selección inadecuada del polímero. El objetivo del trabajo fue analizar el proceso de diseño de un sistema de atmósfera modificada, para conseguir la adecuada conservación en fresco después de la cosecha de productos hortofrutícolas. Se usaron como caso de estudio frutos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en madurez de consumo. Se caracterizó la actividad respiratoria de estos frutos mediante la teoría de la cinética enzimática de Michaelis-Menten y se aplicaron balances de materia a las fases de régimen transitorio y de régimen estacionario de un sistema de atmósfera modificada para definir los parámetros adecuados de operación. Se encontró que la concentración de CO<sub>2</sub> que se desarrolla dentro del envase y el espesor requerido del mismo son función de la concentración a instalar de O<sub>2</sub> y que el tiempo de instalación del sistema de atmósfera modificada depende del volumen libre dentro del envase.

**Palabras clave adicionales:** *Physalis ixocarpa*, modelado, atmósferas modificadas, simulación.

### ABSTRACT

The modified atmospheres are conservation systems of horticultural products in fresh, which use polymeric films as package. Its main problem is the development of a fermentative metabolism, caused by a non-adequate film selection. The objective of the work was to analyze the modified atmosphere design process to achieve an adequate conservation in fresh of horticultural products after harvest. Fruits of husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) at consumption maturity were used as system to be studied. The respiratory activity of these fruits was characterized in terms of the Michaelis-Menten enzymatic theory. Mass balances were applied to the modified atmosphere non-steady state and steady state phases. It was found that the CO<sub>2</sub> concentration that is installed inside the package and the thickness of the later are function of the O<sub>2</sub> concentration that has to be installed, and that the installation time depends on the free volume inside the system.

**Additional key words:** *Physalis ixocarpa*, modeling, modified atmospheres, simulation.

### INTRODUCCIÓN

Las atmósferas modificadas (AM) son sistemas de conservación de productos hortofrutícolas en fresco después de la cosecha. En su desarrollo se usan películas plásticas que forman bolsas y alojan al material que se conserva. A partir del

cierre del sistema se inicia la modificación de la mezcla gaseosa dentro del envase, como resultado de la actividad respiratoria que consume O<sub>2</sub> y libera CO<sub>2</sub>, dando como resultado la disminución en la concentración del primero y la elevación de la del segundo. A medida que crece el gradiente de concentración de estos gases con respecto al medio externo, se induce en forma

creciente la salida de  $\text{CO}_2$  y el ingreso de  $\text{O}_2$  a través de las paredes del polímero mediante un mecanismo de permeación (Rodríguez-Félix *et al.*, 2005). Al cabo de cierto tiempo, las velocidades de consumo de  $\text{O}_2$  y producción de  $\text{CO}_2$  se igualan con estas velocidades de permeación y entonces las concentraciones alcanzan valores constantes, a lo que se llama una condición de régimen estacionario (Valle-Guadarrama *et al.*, 2005).

Un problema frecuente en los sistemas de AM es el desarrollo de un metabolismo fermentativo, originado por una caída excesiva de la concentración de  $\text{O}_2$  hasta niveles en que la provisión de energía por medio aeróbico deja de ser suficiente para la actividad metabólica y se produce una transición a una provisión energética por medio anaeróbico. Como los productos de la fermentación pueden ser tóxicos al producto es necesario evitar esta situación (Boersig *et al.*, 1988). Normalmente, la selección del plástico de envase se hace con apoyo de procesos de experimentación de prueba y error, los cuales requieren mucho tiempo y recursos para determinar los parámetros de diseño adecuados. La premisa del presente trabajo es que el modelado del proceso de instalación de la AM puede sustituir al método de experimentación de prueba y error en el diseño del sistema. Varios autores han mostrado que con la aplicación de rutinas de balance de materia pueden considerarse los distintos procesos de intercambio gaseoso y describir la operación del sistema (Cameron *et al.*, 1995; Valle-Guadarrama *et al.*, 2005). Sin embargo, las rutinas generalmente se han enfocado al cuidado del  $\text{O}_2$  y no se ha consolidado un estudio conjunto con el  $\text{CO}_2$  y con la relación con los parámetros geométricos de la AM. En tal contexto, el objetivo del trabajo fue analizar el proceso de diseño de un sistema de atmósfera modificada, para conseguir la adecuada conservación de productos hortofrutícolas en fresco después de la cosecha. Como caso de estudio se utilizaron frutos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en madurez de consumo, el cual es un producto de importancia económica en México, al ocupar el quinto lugar entre las especies olerícolas (Peña *et al.*, 2004). Dado que el estudio del comportamiento postcosecha de este fruto es incipiente, los resultados del presente trabajo serán útiles para definir mejores condiciones en su manejo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Modelado de un sistema de AM

En la fase de régimen estacionario de una AM las velocidades de consumo de  $\text{O}_2$  y producción de  $\text{CO}_2$  por los frutos empacados resultan iguales a las velocidades de ingreso de  $\text{O}_2$  y salida de  $\text{CO}_2$ , respectivamente, a través de las paredes del empaque plástico: Esto se puede expresar en la forma de las Ecuaciones (1) y (2):

$$r_{\text{O}_2} = m_{fr} \cdot g_{\text{O}_2} \quad (1)$$

$$r_{\text{CO}_2} = m_{fr} \cdot g_{\text{CO}_2} \quad (2)$$

El intercambio gaseoso a través del plástico ocurre por un fenómeno de permeación (Ecuaciones 3 y 4; Banks *et al.*, 1995).

Por otro lado, la velocidad de consumo de  $\text{O}_2$  ( $g_{\text{O}_2}$ ) puede expresarse por medio de la teoría de la cinética enzimática de Michaelis-Menten con un modelo como la Ecuación (5) (Hertog *et al.*, 1998) y la velocidad de producción de  $\text{CO}_2$  ( $g_{\text{CO}_2}$ ) a través del cociente respiratorio ( $C_R$ ) (Ecuación 6; Hertog *et al.*, 2003):

$$r_{\text{O}_2} = \frac{\bar{P}_{\text{O}_2} \cdot A_p \cdot (p_{\text{O}_2}^e - p_{\text{O}_2}^i)}{\delta} \quad (3)$$

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{\bar{P}_{\text{CO}_2} \cdot A_p \cdot (p_{\text{CO}_2}^i - p_{\text{CO}_2}^e)}{\delta} \quad (4)$$

$$g_{\text{O}_2} = \frac{g_{\text{O}_2}^{\max} p_{\text{O}_2}^i}{K_M + p_{\text{O}_2}^i \left(1 + \frac{p_{\text{CO}_2}^i}{K_a}\right)} \quad (5)$$

$$g_{\text{CO}_2} = C_R g_{\text{O}_2} \quad (6)$$

Si se sustituyen las Ecuaciones (3) y (5) en la Ecuación (1) y las Ecuaciones (4) y (6) en la Ecuación (2), se obtienen las Ecuaciones (7) y (8) donde implícitamente se define a la velocidad máxima de producción de  $\text{CO}_2$  ( $g_{\text{CO}_2}^{\max}$ ;  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) como el producto del cociente respiratorio ( $C_R$ ) y la velocidad máxima de consumo de  $\text{O}_2$  ( $g_{\text{O}_2}^{\max}$ ). Estos modelos representan la operación del sistema de AM en la fase de régimen estacionario:

$$\frac{\bar{P}_{\text{O}_2} A_p (p_{\text{O}_2}^e - p_{\text{O}_2}^i)}{\delta} = \frac{m_{fr} g_{\text{O}_2}^{\max} p_{\text{O}_2}^i}{K_M + p_{\text{O}_2}^i \left(1 + \frac{p_{\text{CO}_2}^i}{K_a}\right)} \quad (7)$$

$$\frac{\bar{P}_{\text{CO}_2} A_p (p_{\text{CO}_2}^i - p_{\text{CO}_2}^e)}{\delta} = \frac{m_{fr} g_{\text{CO}_2}^{\max} p_{\text{O}_2}^i}{K_M + p_{\text{O}_2}^i \left(1 + \frac{p_{\text{CO}_2}^i}{K_a}\right)} \quad (8)$$

Para determinar el valor de las constantes  $g_{\text{O}_2}^{\max}$ ,  $K_M$  y  $K_a$ , Raj y Paul (2007) propusieron invertir la Ecuación (5), para obtener la Ecuación (9), cuyo formato simplificado está representado por la Ecuación (10):

$$\frac{1}{g_{\text{O}_2}} = \left(\frac{K_M}{g_{\text{O}_2}^{\max}}\right) \left(\frac{1}{p_{\text{O}_2}^i}\right) + \left(\frac{1}{K_a \cdot g_{\text{O}_2}^{\max}}\right) (p_{\text{CO}_2}^i) + \frac{1}{g_{\text{O}_2}^{\max}} \quad (9)$$

$$\frac{1}{g_{\text{O}_2}} = (A) \left(\frac{1}{p_{\text{O}_2}^i}\right) + (B) (p_{\text{CO}_2}^i) + C \quad (10)$$

En esta última relación,  $A$ ,  $B$  y  $C$  son constantes que se

obtuvieron con rutinas de regresión. Para ello se usaron frutos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) cosechados en madurez de consumo en la región de Ocopulco, México, a finales de agosto de 2006. Se formaron tres lotes de frutos con peso de 2.72 ( $\pm 0.04$ ) kg. Cada lote se colocó en un recipiente hermético, de paredes impermeables a gases y de 9.1 L de capacidad, el cual se cerró, se colocó a 20 °C y durante 12 h se le realizaron mediciones de las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, a intervalos de 15 y 60 min, respectivamente. En cada corrida se determinó el peso de los frutos y el volumen libre en el recipiente. Los datos resultantes consistieron en cinéticas de cambio de concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en el interior de los recipientes en función del tiempo, originadas por la actividad respiratoria de los frutos. En cada cinética, el periodo total de evaluación se dividió en intervalos iguales de 1 h. En cada periodo se determinaron las concentraciones iniciales y finales de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y se obtuvieron valores de consumo y producción de estos gases ( $g_{O_2}$  y  $g_{CO_2}$ ), con apoyo de las Ecuaciones (11) y (12):

$$g_{O_2} = \frac{(y_{O_2}^{ini} - y_{O_2}^{fn}) V_L P_{tot} M_{O_2}}{m_{fr} t_r R (T + 273.15)} \quad (11)$$

$$g_{CO_2} = \frac{(y_{CO_2}^{fn} - y_{CO_2}^{ini}) V_L P_{tot} M_{CO_2}}{m_{fr} t_r R (T + 273.15)} \quad (12)$$

En cada intervalo se obtuvo un valor del cociente respiratorio mediante la Ecuación (6) y al final todos los valores se promediaron para obtener un valor representativo de  $C_R$  de la corrida experimental. También se obtuvo un valor promedio de las concentración de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y éstas se expresaron como presiones parciales ( $p_{O_2}^i, p_{CO_2}^i$ ; 1 Kpa de presión parcial es equivalente a 1.282 % de concentración a la presión atmosférica de 77.993 kPa). De esta información se formó un conjunto de ternas de datos ( $1/g_{O_2}, 1/p_{O_2}^i, p_{CO_2}^i$ ), que se manejaron en una rutina de regresión lineal múltiple con el programa Sigma Plot (SPSS, 2000), de donde se obtuvieron las constantes  $A, B$  y  $C$  de la Ecuación (10) y de ellas se obtuvieron los parámetros de Michaelis-Menten  $g_{O_2}^{max}, K_M$  y  $K_a$  con el uso de las Ecuaciones (13):

$$g_{O_2}^{max} = \frac{1}{C}; \quad K_M = A \cdot g_{O_2}^{max}; \quad K_a = \frac{1}{B \cdot g_{O_2}^{max}} \quad (13)$$

Se decidió evaluar el uso de bolsas de polietileno de baja densidad (PBD) de 45 cm x 30 cm para empacar lotes de frutos de masa  $m_{fr}$  igual a 1 kg. Se determinó que el cierre de la bolsa puede hacerse a 30 cm de la base, lo que produjo un área de intercambio de gases  $A_F$  de 0.18 m<sup>2</sup>. Mediante un método de aforo se determinó que el volumen libre  $V_L$  dentro de los empaques tendría un valor máximo de 3 x 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>. Por otro lado, según Cameron *et al.* (1995) el PBD presenta coeficientes de permeabilidad a O<sub>2</sub> y a CO<sub>2</sub> de 27 x 10<sup>-13</sup> y 99 x 10<sup>-13</sup> mol · s<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup> · kPa<sup>-1</sup>, respectivamente. Asimismo, se aceptó

que en el ambiente externo la concentración de O<sub>2</sub> sería de 20.85 % ( $p_{O_2}^e$  igual a 16262 Pa) y la de CO<sub>2</sub> de 0.03 % ( $p_{CO_2}^e$  igual a 23 Pa).

Se estudiaron las características de la AM para conseguir concentraciones de O<sub>2</sub> en el rango de 2 a 20 % y de CO<sub>2</sub> en el rango de 0 a 15 % a temperatura de 20 °C, para lo cual se utilizaron las Ecuaciones (7) y (8). Se hizo un análisis de grados de libertad de estas relaciones; se encontró que se conocía la magnitud de las variables  $m_{fr}, A_p, \bar{P}_{O_2}, \bar{P}_{CO_2}, g_{O_2}^{max}, K_M, K_a, p_{O_2}^e$  y  $p_{CO_2}^e$ , pero se desconocía el valor del espesor del empaque  $\delta$  y de las presiones parciales puntuales de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro del mismo ( $P_{O_2}^i$  y  $P_{CO_2}^i$ ). Dado que se contaba con dos ecuaciones para obtener el valor de tres variables, una de estas últimas debía ser definida o fijada previamente, al igual que el conjunto citado de variables conocidas. Como uno de los problemas frecuentes de la operación de las AM es el desarrollo de un metabolismo fermentativo, derivado de una reducción excesiva de O<sub>2</sub>, se decidió considerar a la presión parcial de O<sub>2</sub> como variable independiente, lo que causó que el espesor ( $\delta$ ) del empaque y la presión parcial de CO<sub>2</sub> ( $P_{CO_2}^i$ ) en su interior fueran consideradas variables dependientes y su valor se determinó mediante las Ecuaciones (7) y (8), que se resolvieron simultáneamente.

### Análisis del tiempo de instalación de la AM

Se hizo un balance de materiales para describir la fase de instalación de la AM considerando que ésta se desarrolla en forma pasiva. Durante dicha etapa, las concentraciones de O<sub>2</sub> y de CO<sub>2</sub> cambian a medida que transcurre el tiempo y dicho comportamiento puede representarse modificando las Ecuaciones (1) y (2), para incluir un término de agotamiento en el caso del O<sub>2</sub> o un término de acumulación en el caso del CO<sub>2</sub>, en la forma descrita por las Ecuaciones (14) y (15):

$$r_{O_2} - m_{fr} \cdot g_{O_2} = \frac{dm_{O_2}}{dt} \quad (14)$$

$$m_{fr} \cdot g_{CO_2} - r_{CO_2} = \frac{dm_{CO_2}}{dt} \quad (15)$$

donde  $dm_{CO_2}$  expresa un cambio diferencial en la masa de O<sub>2</sub>,  $dm_{CO_2}$  un cambio diferencial en la masa de CO<sub>2</sub>, ambos en la atmósfera gaseosa interior del empaque, y  $dt$  representa un elemento diferencial de tiempo. Se aceptó que por las condiciones de baja presión en las que se desarrollan los sistemas de AM, la mezcla gaseosa del interior del empaque se comporta como un gas ideal. Bajo esta consideración las Ecuaciones (14) y (15) se expresaron en la forma de las Ecuaciones (16) y (17):

$$\frac{dp_{O_2}^i}{dt} = \left[ \frac{R(T+273.15)}{V_L M_{CO_2}} \right] \left[ \frac{P_{O_2} A_p (p_{O_2}^e - p_{O_2}^i)}{\delta} - \frac{m_{fr} g_{CO_2}^{max} p_{O_2}^i}{K_m + p_{O_2}^i \cdot \left(1 + \frac{p_{CO_2}^i}{K_a}\right)} \right] \quad (16)$$

$$\frac{dp_{CO_2}^i}{dt} = \left[ \frac{R(T+273.15)}{V_L M_{CO_2}} \right] \left[ \frac{m_{fr} g_{CO_2}^{max} p_{O_2}^i}{K_m + p_{O_2}^i \cdot \left(1 + \frac{p_{CO_2}^i}{K_a}\right)} - \frac{P_{CO_2} A_p (p_{CO_2}^i - p_{CO_2}^e)}{\delta} \right] \quad (17)$$

Las ecuaciones fueron resueltas en forma simultánea mediante el método de Runge-Kutta de Cuarto Orden (Burden y Faires, 1986), para observar el proceso de cambio de las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  dentro del envase de la AM y determinar el tiempo de instalación de la misma.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización respiratoria de los frutos de tomate de cáscara

La colocación de frutos de tomate de cáscara en un recipiente hermético de paredes impermeables a gases causó la reducción de la concentración de  $O_2$  y la elevación de la de  $CO_2$  en el volumen libre del sistema en forma logarítmica (Figura 1), lo cual propició que las velocidades de consumo de  $O_2$  y producción de  $CO_2$  disminuyeran con el tiempo (Figura 2). La razón de esto es que, al modificarse la concentración en la atmósfera circundante al fruto, se reduce el gradiente de concentración respecto al interior del mismo, lo que causa una reducción en la velocidad de intercambio gaseoso a través de la epidermis. Además, a medida que disminuye la disponibilidad de  $O_2$  se reduce la actividad respiratoria, principalmente a nivel de la cadena terminal (Taiz y Zeiger, 1998).

La evaluación de los parámetros de Michaelis-Menten reportó valores promedio globales de  $8.18 \times 10^{-9}$  ( $\pm 9.76 \times 10^{-10}$ )  $kg \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$  para  $g_{O_2}^{max}$ , de 2.27 ( $\pm 0.39$ ) kPa para  $K_M$ , de 76.58 ( $\pm 13.55$ ) kPa para  $K_a$ , de 2.59 ( $\pm 0.35$ )  $kg CO_2 \cdot kg^{-1} \cdot O_2$  para  $C_R$  ( $1.88 \pm 0.26$   $mol \cdot mol^{-1}$ ) y de  $2.12 \times 10^{-8}$  ( $\pm 8.26 \times 10^{-9}$ )  $kg \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$  para  $g_{CO_2}^{max}$ . La relación entre la velocidad de consumo de  $O_2$  y las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$ , expresadas como presiones parciales, se ajustó bien a la Ecuación (9) y se obtuvieron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.9986 ( $\pm 0.0009$ ). La teoría clásica de la cinética enzimática postula la existencia de cuatro tipos de comportamientos en esta relación, en función del agente de inhibición presente (Peppelenbos y van't Leven, 1996; Hertog *et al.*, 1998). En el presente estudio se seleccionó el modelo correspondiente a una inhibición incompetitiva de la velocidad de consumo de  $O_2$  por el  $CO_2$  y el valor alto de  $R^2$  obtenido sugiere que dicha selección fue correcta y que en los frutos de

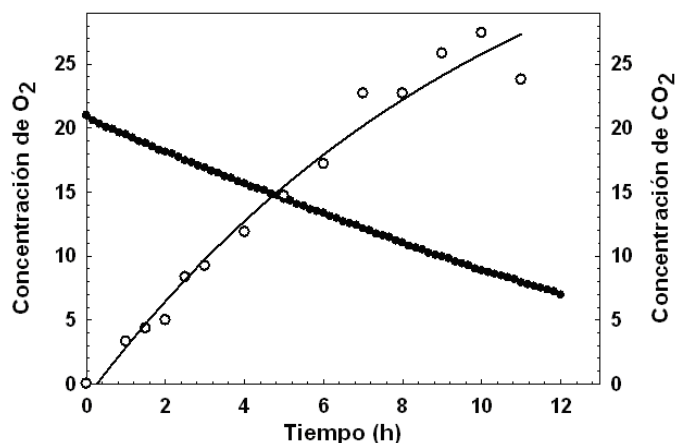


Figura 1. Comportamiento de las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  en el interior de un recipiente hermético de paredes impermeables a gases.

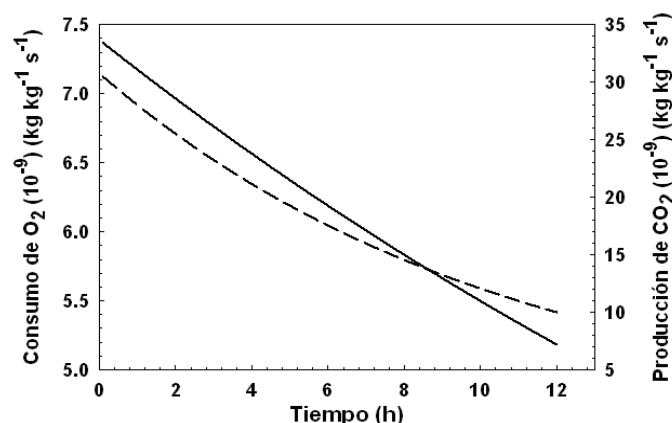
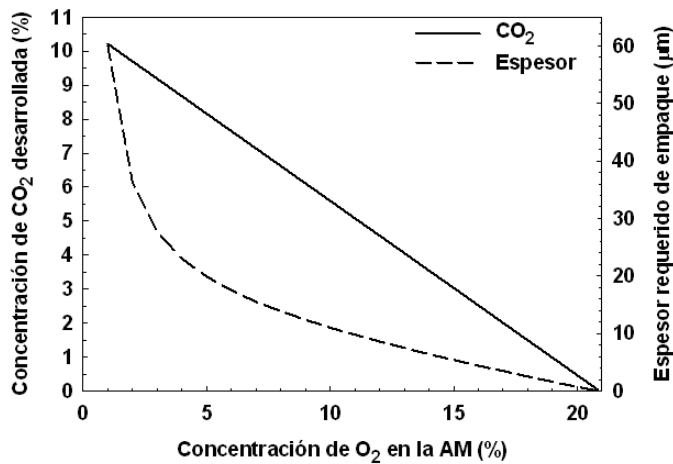


Figura 2. Comportamiento del consumo y producción de  $O_2$  y  $CO_2$  en el interior de un recipiente hermético de paredes impermeables a gases.

tomate de cáscara el  $CO_2$  inhibe la actividad respiratoria en forma indirecta, al igual a como ocurre en otros frutos como aguacate (Hertog *et al.*, 2003).

### Condiciones de operación de la AM

Las Ecuaciones (7) y (8) permitieron estudiar la relación entre la concentración instalada de  $O_2$  en la AM, el espesor requerido del material de envase (PBD) y la concentración desarrollada de  $CO_2$ . Se encontró que a medida que se busca una concentración de  $O_2$  mayor, se requiere un espesor menor (Figura 3). Asimismo, a medida que se buscan concentraciones menores de  $O_2$  el espesor se incrementa en forma exponencial. En adición a lo mostrado por la Figura 2, se encontró que con espesor mayor a 500 mm se nulifica el intercambio gaseoso y se causa que la concentración de  $O_2$  caiga a niveles inferiores a 0.1 %, lo que podría corresponder a condiciones anaeróbicas. Por otro lado, se encontró que la relación entre la concentración fijada de  $O_2$  y la concentración desarrollada de  $CO_2$  es lineal. Dado que para



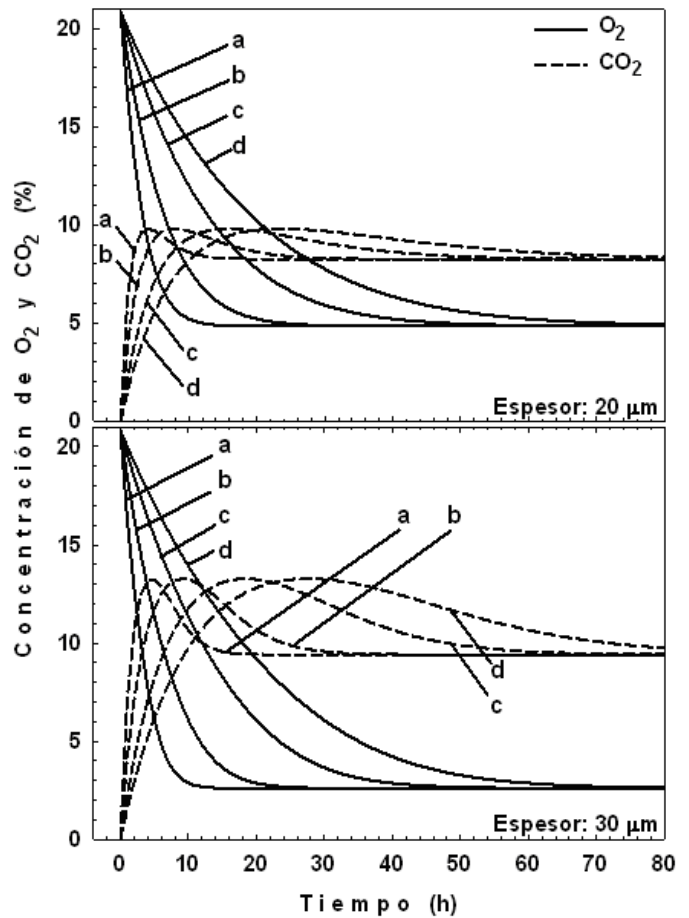
**Figura 3.** Relación entre la concentración de  $O_2$ , la concentración de  $CO_2$  y el espesor de película en el desarrollo de una AM para frutos de tomate de cáscara.

obtener mayores concentraciones de  $O_2$  se requiere reducir la resistencia de la película plástica al intercambio gaseoso, este mismo hecho propicia mayor intercambio de  $CO_2$ , de tal forma que a mayor concentración impuesta de  $O_2$  se desarrolla menor concentración de  $CO_2$  y a medida que se buscan menores concentraciones de  $O_2$ , el  $CO_2$  se instala en mayor concentración, debido a que deben usarse mayores espesores.

#### Análisis del tiempo de instalación

La Figura 4 muestra el comportamiento de las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  durante la fase de instalación de la AM al usar como empaque PBD con dos espesores (20 y 30 mm). Resultó evidente que las concentraciones gaseosas se modifican con el tiempo y finalmente alcanzan una condición de régimen estacionario, la cual fue congruente con la predicción hecha al considerar sólo esta fase. Se encontró que en tanto la concentración de  $O_2$  sigue un comportamiento logarítmico, la concentración de  $CO_2$  no lo hace así y se generan picos de máxima concentración dentro del envase. Esto sugiere que al inicio de la fase de instalación de la AM la velocidad de cambio de concentración dentro del envase depende más de la producción de  $CO_2$  que de la velocidad de intercambio con el medio externo, pero al paso de tiempo este comportamiento se invierte y finalmente ambas velocidades se igualan.

Se encontró que cuanto mayor es el volumen libre dentro del envase, mayor es el tiempo requerido para que se alcance la condición de régimen estacionario. Si se considera que el beneficio de una AM se obtiene de la exposición del producto a las condiciones definidas para el régimen estacionario, dicho beneficio comenzará a obtenerse después de 10 h para la condición con 0.5 L de volumen libre y después de 66 h de operación en la condición de 3 L, lo cual constituye una desventaja. En tal contexto, cobra importancia el concepto de atmósfera activa, donde la instalación de la AM se hace en forma artificial (Rodríguez-Félix *et al.*, 2005) con objeto de reducir la fase transitoria.



**Figura 4.** Velocidad de cambio de concentración de  $O_2$  y  $CO_2$  en la fase de instalación de una AM, para lotes de 1 kg de frutos de tomate de cáscara, bolsas de PBD en dos espesores (20 y 30 mm), área de intercambio de  $0.09 \text{ m}^2$  y volumen libre de 0.5 (a), 1.0 (b), 2.0 (c) y 3.0 L (d).

#### CONCLUSIONES

Se desarrolló el modelado de la operación de un sistema de atmósfera modificada para la conservación de frutos de tomate de cáscara. La actividad respiratoria del producto se ajustó bien a modelos tipo cinética enzimática de Michaelis-Menten. Se encontró que la concentración de  $CO_2$  que se desarrolla dentro del envase y el espesor requerido del mismo son función de la concentración a instalar de  $O_2$ . El tiempo de instalación del sistema de atmósfera modificada depende del volumen libre dentro del envase.

#### LITERATURA CITADA

- Banks N.H.; Cleland D.J.; Cameron A.C.; Beaudry R.M.; Kader A.A. 1995. Proposal for rationalized system of units for postharvest research in gas exchange. *HortScience* 30: 1129-1131.
- Boersig M.R.; Kader A.A.; Romani R.J. 1988. Aerobic-anaerobic respiratory transition in pear fruit and cultured pear fruit cells. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 113: 869-873.
- Burden R.L.; Faires J.D. 1985. *Numerical Analysis*. Boston: PWS. 721 p.

- Cameron A.C.; Talasila P.Ch.; Joles D.W. 1995. Predicting film permeability needs for modified-atmosphere packaging of lightly processed fruits and vegetables. *HortScience* 30: 25-34.
- Hertog M.L.A.T.; M., H. W. Peppelenbos, R.G. Evelo, and L.M.M. Tijskens. 1998. A dynamic and generic model of gas exchange of respiring produce: the effects of oxygen, carbon dioxide and temperature. *Postharvest Biology and Technology* 14: 335-349.
- Hertog, M. L.A.; Nicholson S.E.; Whitmore K. 2003. The effect of modified atmosphere on the rate of quality change in 'Hass' avocado. *Postharvest Biology and Technology* 29: 41-53.
- Peña L.A.; Mejía C.A.; Rodríguez P.M.E.; Carballo C.A.; Rodríguez P.J.E.; Moreno M.M. 2004. Parámetros genéticos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) variedad Verde Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27(1): 1-7.
- Peppelenbos H.W.; van't Leven J. 1996. Evaluation of four types of inhibition for modeling the influence of carbon dioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 7: 27-40.
- Raj R.D.; Paul S. 2007. Transient state in-pack respiration rates of mushroom under modified atmosphere packaging based on enzyme kinetics. *Biosystems Engineering* 98: 319326.
- Rodríguez-Félix A.; Rivera-Domínguez M.; González-Aguilar G.A. 2005. Uso de atmósferas modificadas y controladas. *In: González-Aguilar G.A.; Gardea A.A.; Cuamea-Navarro F. (eds.). Nuevas Tecnologías de Conservación de Productos Vegetales Frescos Cortados.. Sonora, México: CIAD, A. C. pp: 446-474.*
- SPSS. 2000. SigmaPlot for Windows. Ver. 3.2. Chicago: SPSS, Inc.
- Taiz L.; Zeiger E. 1998. *Plant Physiology*. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., Publishers. 792 p.
- Valle-Guadarrama S.; Espinosa-Solares T.; Saucedo-Veloz C.; Peña-Valdivia C.B. 2005. Oxygen diffusivity in avocado fruit tissue. *Biosystems Engineering* 92(2): 197-206.

## NOMENCLATURA

$A_p$	Área de intercambio gaseoso de la película de envase (m <sup>2</sup> )
$C_R$	Cociente respiratorio (adimensional)
$\delta$	Espesor de la película de envase (m)
$g_{O_2}, g_{CO_2}$	Velocidades de consumo de O <sub>2</sub> y producción de CO <sub>2</sub> (k·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )
$g_{CO_2}^{max}$	Velocidad máxima de producción de CO <sub>2</sub> (kg·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )
$g_{O_2}^{max}$	Velocidad máxima de consumo de O <sub>2</sub> (kg·kg <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )
$K_a$	Constante de inhibición por CO <sub>2</sub> (Pa)
$K_M$	Constante de Michaelis-Menten (Pa)
$m_{fr}$	Masa de los frutos en la AM (kg)
$M_{O_2}, M_{CO_2}$	Pesos moleculares de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>
$\bar{P}_{O_2}, \bar{P}_{CO_2}$	Coefficientes de permeabilidad a O <sub>2</sub> y a CO <sub>2</sub> del PBD (kg·m·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·Pa <sup>-1</sup> )
$p_{O_2}^e, p_{CO_2}^e$	Presiones parciales de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> fuera del envase plástico (Pa)
$p_{O_2}^i, p_{CO_2}^i$	Presiones parciales de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> dentro del envase plástico (Pa)
$p_{tot}$	Presión total (presión atmosférica; 77993 Pa)
$R$	Constante del gas ideal (8314,4 Pa·m <sup>-3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
$r_{O_2}, r_{CO_2}$	Velocidades de intercambio de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> por permeación (kg·s <sup>-1</sup> )
$T$	Temperatura (°C)
$t_r$	Tiempo de un intervalo de evaluación (s).
$V_L$	Volumen libre (m <sup>3</sup> )
$y_{CO_2}^{fin}, y_{CO_2}^{ini}$	Concentraciones final e inicial de CO <sub>2</sub> (fracción volumen)
$y_{O_2}^{fin}, y_{O_2}^{ini}$	Concentraciones final e inicial de O <sub>2</sub> (fracción volumen)