

Modelamiento de la respiración del mango (*Mangifera indica* L.) usando el método de sistema cerrado a diferentes temperaturas

José Edgar Zapata Montoya¹, Camilo Agudelo Cuartas², Claudia Restrepo³

Resumen - Medir la tasa de respiración de los productos frescos es esencial para el correcto diseño de sistemas de envasado. Para tal efecto, las tasas de consumo de O₂ y producción de CO₂, suelen ser medidas como datos iniciales del comportamiento del sistema. El objetivo del presente trabajo fue modelar la respiración del mango entero (*Mangifera indica* L), variedad Tommy Atkins en un sistema cerrado (SC) a tres temperaturas (4, 25 y 35°C) y 90 h en almacenamiento. Inicialmente se ajustó un modelo matemático para predecir la concentración de gases en función del tiempo. Con esta información, se ajustaron dos modelos para predecir las velocidades de respiración. Un modelo de regresión y otro basado en la cinética de inhibición enzimática de Michaelis-Menten (MM). Se ajustó además una ecuación tipo Arrhenius para evaluar el efecto de la temperatura sobre la tasa de respiración y un modelo semi-empírico que predice el efecto del tiempo y la temperatura simultáneamente. Los resultados mostraron que el modelo de MM y Arrhenius obtuvieron los mejores ajustes. En este sistema la velocidad de respiración del mango presenta una dependencia directa con la temperatura y la concentración de los gases, viéndose inhibida por la presencia de CO₂ y favorecida por el O₂.

Palabras clave: velocidad de respiración, vida útil, madurez, empaçado en atmosfera modificada, ecuación de Arrhenius.

Modelling the respiration of mango (*Mangifera indica* L.) using the closed system method at different temperatures

Abstract - Measuring the respiration rate of fresh products is essential to design correct of packaging systems. For such effect, rates of consumption of O₂ and production of CO₂, usually are taken as initial data of system compartment. The aim of this work, was modelling the respiration of whole mango (*Mangifera indica* L.), variety Tommy Atkins using a closed system (CS) at three temperatures (4, 25 and 35°C) and 90 h in storage. Initially, was fitted a mathematic model to predict behavior the concentration of gases as a time function. With this information, two models were fitted to predict the respiration rates. A model based on Michaelis-Menten's enzymatic kinetics (MM) and a model based on regression model. Also, an equation type Arrhenius was used to evaluate the temperature effect on respiration rate and a semi-empirical model which predict simultaneously the effect of time and temperature. The results showed that the Arrhenius and MM models obtained the best fits. In this system, the respiration rate of whole mango depends of temperature and of gases concentration, in which the respiration rate is inhibited by CO₂ and is favored by increased O₂.

Index terms: Respiration rate, shelf life, ripeness, modified atmosphere packaging, Arrhenius equation.

Corresponding author:
edgar.zapata@udea.edu.co

Received: May 29, 2017.

Accepted : November 16, 2017.

Copyright: All the contents of this journal, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution License.



¹Ing. Químico (Universidad de Antioquia UdeA), Ph.D Biotecnología (Universidad de Granada, España). Departamento de Alimentos, Docente de Planta. Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, Universidad de Antioquia. Calle 67 N° 53-108. Box Air 1226, Medellín, Colombia. Correo electrónico: edgar.zapata@udea.edu.co

²Ing. Alimentos (Universidad de Antioquia), MSc en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Departamento de Alimentos, Docente de Cátedra. Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, Universidad de Antioquia. Calle 67 N° 53-108. Box Air 1226, Medellín, Colombia. e-mail: camilo297@yahoo.com

³Profesional en CTA, MSc en Ciencias Farmacéuticas: Alimentos. Universidad de Antioquia, Colombia. Directora Técnica en el Instituto de Ciencia y Tecnología Alimentaria (Foundation INTAL), Carrera 50G No. 12 Sur-91. Itagüí, Colombia. e-mail: crestrepo@fundacionintal.org

Introducción

La respiración representa uno de los procesos metabólicos más importantes en las de frutas y vegetales cosechados, debido a que está asociada con diferentes reacciones de deterioro como son la reducción de su contenido de ácidos orgánicos (Pacheco et al., 2017), la síntesis del flavor y la fermentación entre otras reacciones de degradación de la pared celular (Mattiuz y Durigan, 2001; Heydari et al., 2010), razón por la que se vincula con la calidad de las frutas y vegetales cosechados (Nicolai et al., 2005). Una alta velocidad de respiración implica un metabolismo acelerado y está asociada con una vida corta en almacenamiento (Lurie y Crisosto, 2005), por lo que controlar la velocidad de respiración permite regular el metabolismo del vegetal y de esa forma puede extender su vida en almacenamiento (Kan et al., 2010). Este proceso varía según la especie, variedad, temperatura de almacenamiento y estado fisiológico del vegetal (Nicolai et al., 2009). Por otro lado, todas las reacciones bioquímicas durante la madurez del vegetal, se ven afectadas por la temperatura, por lo que esta variable afecta de forma directa su calidad durante el almacenamiento (Nicolai et al., 2009), además del efecto que tiene sobre el crecimiento de hongos, bacterias e insectos (Nicolai et al., 2005).

Por medio de cambios en la composición de la atmósfera alrededor de un alimento, se puede reducir su velocidad de respiración, con lo que a su vez se pueden inhibir o retardar las reacciones de deterioro, aumentando la vida útil (Luo et al., 2011; Selcuk y Erkan, 2015). Por ejemplo un descenso en la concentración de O_2 resulta en una disminución del metabolismo de productos como brócoli, zanahorias, peras, tomates (Nicolai et al., 2005), papaya (Zapata et al., 2004), diferentes presentaciones de mango (Agudelo et al., 2016) entre otros. El CO_2 puede actuar como supresor de la respiración en vegetales como manzanas, brócoli (Nicolai et al., 2005) mango (Ravindra y Goswami, 2008; Agudelo et al., 2016) y banana (Bhande et al., 2008), mientras que en cebollas, lechuga y espinaca (Nicolai et al., 2005), no presenta ningún efecto inhibitorio. Los efectos negativos del oxígeno se deben principalmente a que la acumulación de oxígeno reactivo daña la integridad de la membrana mitocondrial, resultando finalmente en una disfunción mitocondrial irreversible, lo cual se cree que es la principal causa de la senescencia en diferentes tipos de organismos, entre los que se encuentran las frutas poscosecha (Qin et al., 2009).

La obtención de modelos del proceso respiratorio es un importante paso en el diseño y selección de sistemas de empaque y almacenamiento de productos hortofrutícolas como es el caso del empaquetado en atmósferas modificadas (Ravindra & Goswami, 2008; Agudelo et al., 2016). Por otro lado, en nuestro medio son escasos los trabajos orientados a evaluar este tipo de parámetros en frutas y vegetales. Reconociendo que la modelización del

proceso respiratorio con todos los factores implicados en la reacción enzimática sería de muy alta complejidad y poco práctico, la estrategia usual ha sido desarrollar modelos empíricos para cada producto como una función de variables controlables, como la temperatura o la concentración gaseosa (Guevara et al., 2006; Rai & Paul, 2007; Bhande et al., 2008; Agudelo et al., 2016). El objetivo del presente trabajo es evaluar diferentes modelos para la predicción de la tasa de respiración de mango entero var. Tommy Atkins, a tres temperaturas diferentes en un sistema cerrado.

Materiales y Métodos

Preparación de la materia prima

Se trabajó con mango (*Mangifera indica L.*), adquirido en la ciudad de Medellín-Colombia. Se utilizó la variedad Tommy Atkins en estado de madurez fisiológica, con peso entre 350-550 g, con valores promedio de °Brix, pH y acidez titulable de 9.17, 3.27 y 0.96% respectivamente (Agudelo et al., 2016). Se lavaron con detergente alcalino y se desinfectaron con una solución a 100 ppm de hipoclorito de sodio (Ngarmsak et al., 2005; Agudelo, 2014).

Cálculo de respiración experimental

Se determinó la velocidad de respiración a tres temperaturas (4°C, 25°C y 35°C), cada una por duplicado, en un recipiente hermético con una capacidad de 4000 mL (Ravindra y Goswami, 2008; Agudelo, 2014), el cual inicialmente se encontraba a condiciones atmosféricas (20.94% de O_2 , 78.08% de N_2 y 0.03% de CO_2). Las concentraciones de O_2 y CO_2 se midieron con un Analizador de gases PBI Check Point O_2/CO_2 (Dansensor, Dinamarca).

Para el cálculo de la velocidad de respiración se utilizaron las ecuaciones (1) y (2), las cuales ya han sido utilizadas en productos como pimiento rojo (Artés Hernández et al., 2010), mango (Ravindra & Goswami, 2008; Agudelo, 2014), banana (Bhande et al., 2008) y papaya (Martins et al., 2013).

$$R_{O_2} = \left\{ \frac{[O_2]_t - [O_2]_{t+1}}{\Delta t} \right\} \frac{V}{W} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$R_{CO_2} = \left\{ \frac{[CO_2]_{t+1} - [CO_2]_t}{\Delta t} \right\} \frac{V}{W} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde R_{O_2} y R_{CO_2} son las tasas de respiración ($mL \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$), $[O_2]$ y $[CO_2]$ son las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono, t es el tiempo (h), Δt es la diferencia de tiempo entre dos mediciones del respectivo gas, V es el volumen libre en la cámara de respiración (mL) y W es la masa de la fruta entera (kg).

Modelamiento del comportamiento de los gases

Se trabajó con el modelo que se ya había utilizado en banana (Bhande et al., 2008) y mango (Ravindra y Goswami, 2008; Agudelo et al., 2016), el cual se presenta en las ecuaciones (3) y (4) para ajustar la concentración de O_2 y CO_2 respectivamente, en función del tiempo.

$$[CO_2] = \frac{t}{(at+b)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$[O_2] = 0,21 - \frac{t}{(at+b)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde a y b son parámetros de la ecuación y t el tiempo.

Los coeficientes de las ecuaciones (3) y (4) se determinaron por regresión no lineal con el software Matlab R2011a.

Modelamiento de la respiración del mango

La tasa de respiración para el CO_2 (R_{CO_2}) y el O_2 (R_{O_2}) se determinó mediante diferentes métodos matemáticos:

Modelo de Regresión

En este modelo se derivan las ecuaciones (3) y (4) para obtener las ecuaciones (5) y (6) (Ravindra & Goswami, 2008; Agudelo, 2014):

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = \frac{at}{(at+b)^2} + \frac{1}{(at+b)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{at}{(at+b)^2} - \frac{1}{(at+b)} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Las ecuaciones (5) y (6) se rempazan en las ecuaciones (7) y (8), para calcular la tasa de respiración, como sigue:

$$R_{CO_2} = \frac{d[CO_2]}{dt} \frac{V}{W} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$R_{O_2} = - \frac{d[O_2]}{dt} \frac{V}{W} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Modelo de Michaelis-Menten

Se utilizó un modelo basado en la ecuación de Michaelis-Menten, usando principios de inhibición no competitiva de la cinética enzimática, donde se supone que el CO_2 reacciona con un complejo enzima-sustrato (Ravindra y Goswami, 2008; Bhande et al., 2008; Artés Hernández et al., 2010; Agudelo et al., 2016). Las ecuaciones (9) y (10) expresan este mecanismo para el proceso de respiración en términos de la velocidad de consumo de O_2 y velocidad de producción de CO_2 ,

las cuales ya han sido probadas en mango (Ravindra & Goswami, 2008; Agudelo et al., 2016), banano (Bhande et al., 2008), bananito (Castellanos et al., 2012), diversos productos frescos (Lee, Song et al., 1996), pimiento rojo (Artés Hernández et al., 2010), entre otras frutas (Fonseca et al., 2002).

$$R_{O_2} = \frac{V_{mo}[O_2]}{K_{mo} + [1 + [CO_2]/K_{io}][O_2]} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$R_{CO_2} = \frac{V_{mc}[O_2]}{K_{mc} + \left[1 + [CO_2]/K_{ic}\right][O_2]} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde V_{mo} y V_{mc} son las velocidades máximas de respiración para el consumo de O_2 y producción de CO_2 , en ($mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$), respectivamente. K_{mo} y K_{mc} son las constantes de Michaelis-Menten para el consumo de O_2 y producción de CO_2 (% O_2). K_{io} y K_{ic} son las constantes de inhibición para el consumo de O_2 y producción de CO_2 (% CO_2). Estos parámetros se estimaron mediante la linealización de las ecuaciones (9) y (10), como se expresa en las ecuaciones (11) y (12), a las que se aplicó una regresión lineal múltiple con el paquete estadístico R, versión 2.15.0 (The R Foundation for Statistical Computing, Austria).

$$\frac{1}{R_{O_2}} = \frac{1}{V_{mo}} + \frac{k_{mo}}{V_{mo}} \frac{1}{[O_2]} + \frac{1}{k_{io} V_{mo}} [CO_2] \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\frac{1}{R_{CO_2}} = \frac{1}{V_{mc}} + \frac{k_{mc}}{V_{mc}} \frac{1}{[O_2]} + \frac{1}{k_{ic} V_{mc}} [CO_2] \quad (\text{Ecuación 12})$$

Efecto de la temperatura sobre la respiración del mango

El efecto de la temperatura en las velocidades de consumo de O_2 y producción de CO_2 , es un aspecto de primera importancia en la conservación de productos alimenticios (Gomes et al., 2010), por lo que se evaluó el efecto de esta variable, para lo cual se utilizó una ecuación del tipo Arrhenius (Ecuación 13) (Iqbal et al., 2009; Waghmare et al., 2013; Agudelo et al., 2016).

$$R_{gas} = R_p \exp\left[-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right] \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde R_{gas} es la velocidad de consumo de O_2 y producción de CO_2 ($mL\ kg^{-1}\ h^{-1}$), R_p es el factor pre-exponencial de la respiración, E_a es la energía de activación ($kJ\ g^{-1}\ mol^{-1}$), R es la constante universal de los gases ($8.314\ J\ g^{-1}\ mol^{-1}\ K^{-1}$) y T_{abs} es la temperatura absoluta en K.

Concentración de los gases en función del tiempo y la temperatura

Una forma de predecir la concentración de O_2 y de CO_2 , en función del tiempo y la temperatura, es combinar las ecuaciones (1), (2) con la ecuación (13), con lo que se obtiene un *modelo global*, ecuaciones (14) y (15), este tipo de ecuación minimiza los errores en el cálculo de los parámetros (Iqbal et al., 2009; Agudelo et al., 2016).

$$[O_2] = [O_2]_{O_2}^i - R_{p_{O_2}} \exp \left[-\frac{E_{a_{O_2}}}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \times \frac{W}{V_f} \times (t - t_i) \times 100 \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$[CO_2] = [CO_2]_{CO_2}^i + R_{p_{CO_2}} \exp \left[-\frac{E_{a_{CO_2}}}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \times \frac{W}{V_f} \times (t - t_i) \times 100 \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde el superíndice i , indica la concentración inicial de cada gas. Las demás variables se definieron en las ecuaciones (1), (2) y (13).

Utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt de Matlab se determinaron la energía de activación y el factor pre exponencial en la ecuación de Arrhenius (Ecuación 13) y en el modelo Global (Ecuaciones 13 y 14), para cada gas como función de la temperatura y del tiempo (Iqbal et al., 2009; Waghmare et al., 2013; Agudelo 2016).

Resultados y Discusión

Comportamiento de los gases (O_2 y CO_2)

En la Figura 1 se muestra el comportamiento en función del tiempo de los datos experimentales y predichos por las ecuaciones (3) y (4), del O_2 y el CO_2 respectivamente. Cuyos coeficientes aparecen en la Tabla 1. Con base en el comportamiento gráfico y los valores de R^2 , se puede apreciar la calidad del ajuste obtenido.

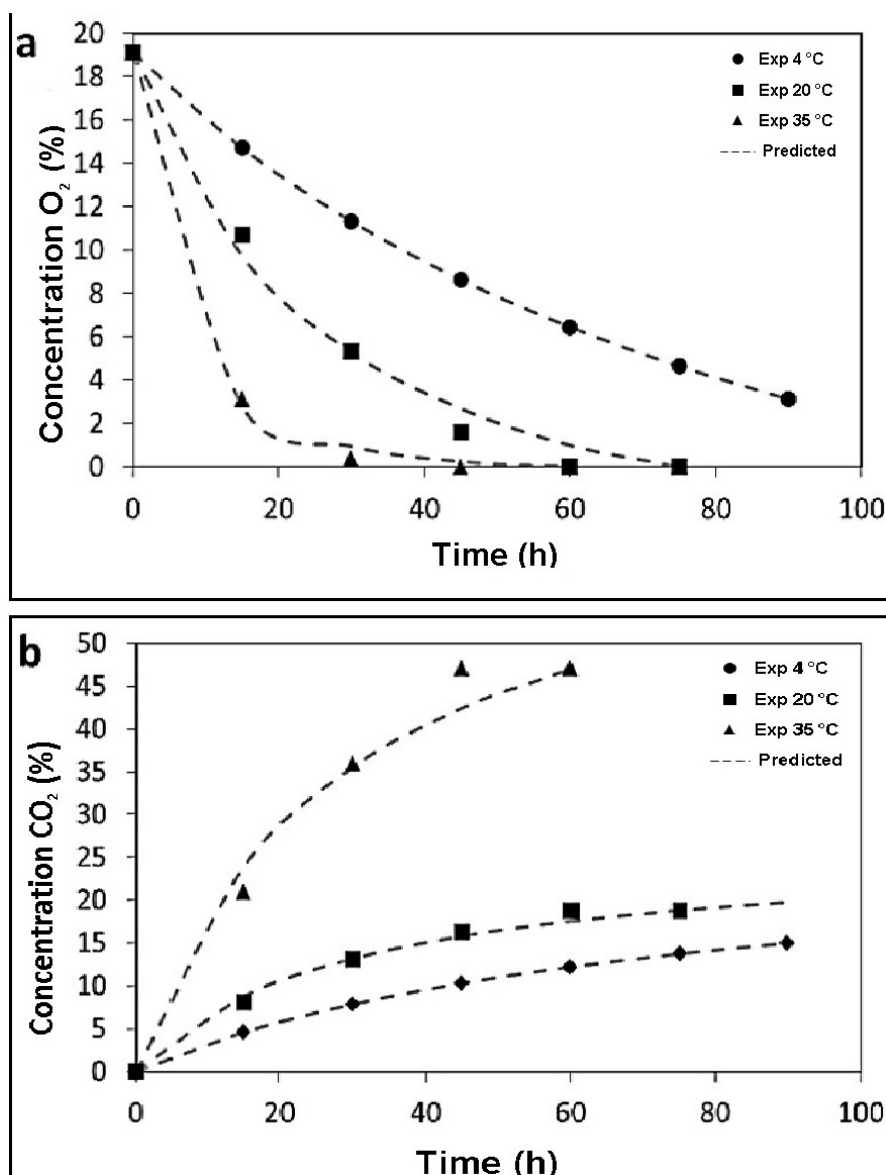


Figura 1. Consumo de O_2 (a) y producción de CO_2 (b) del mango entero, en sistema cerrado a diferentes temperaturas.

Tabla 1. Coeficientes ajustados del modelo de regresión para mango entero, determinados con las ecuaciones (3) y (4)

Temperatura (°C)	Gas	Modelo de regresión (M-R)		
		a	b	R ²
4	CO ₂	3.6360	272.1000	0.9999
	O ₂	2.9550	297.0000	0.9999
25	CO ₂	3.7910	113.8000	0.9893
	O ₂	3.8090	102.8000	0.9836
35	CO ₂	1.4430	41.1300	0.9728
	O ₂	4.8850	18.7500	0.9978

El descenso no lineal en la concentración de O₂ en las condiciones del presente trabajo coincide con el patrón observado para otros productos climatéricos mantenidos en contenedores cerrados (Ravindra y Goswami, 2008; Hagger et al., 1992; Jacxsens et al., 1999; Guevara et al., 2006). Se observa que un aumento de la temperatura aumenta también la pendiente de la gráfica para el comportamiento de los gases, en consecuencia, la tasa de respiración incrementa, al igual que sucede con banana (Bhande et al., 2008) y mango entero var. Armapali (Ravindra y Goswami, 2008), pimiento rojo (Artés Hernández et al., 2010), tiras de zanahoria (Iqbal et al., 2009), manzana (Mahajan y Goswami 2001), brócoli (Torrieri, Perone et al., 2010), cilantro, frijoles y remolacha (Waghmare et al., 2013), piña (Benítez et al., 2012) y diferentes presentaciones de mango (Agudelo et al., 2016).

Velocidad de respiración experimental

En la Figura 2 se presentan las velocidades experimentales de respiración del mango entero almacenado en SC. Al contrastar el comportamiento de los gases en la Figura 1 y el de las velocidades de respiración experimentales en la Figura 2, es claro que a medida que desciende la concentración de O₂ e incrementa la de CO₂, las velocidades de respiración disminuyen. Lo cual ya ha sido reportado en zanahoria (Iqbal et al., 2009) y banana (Heydari et al., 2010). Por otro lado, en la Figura 2 se observa como son afectadas por la temperatura las velocidades experimentales de consumo de O₂ (R_{O₂}) y producción de CO₂ (R_{CO₂}). El valor de R_{O₂} experimental inicial a 4°C es de 12.5 mL kg⁻¹h⁻¹, significativamente inferior comparada con la del mismo gas a 25°C de 27.4 mL kg⁻¹h⁻¹ y a 35°C de 44.31 mL kg⁻¹h⁻¹. Esto se debe a que la velocidad de las reacciones enzimáticas aumenta exponencialmente con el incremento de la temperatura (Lee et al., 1996; Agudelo et al., 2016). Las bajas temperaturas disminuyen la tasa de respiración, el consumo de O₂, la producción de CO₂, producción de etileno y la respuesta de los tejidos a este último, de manera que a bajas temperaturas es mayor el requerimiento de etileno y el tiempo de exposición a este

gas requerido, para que comience el ciclo metabólico y la maduración, a una determinada concentración de etileno (Kader, 1994; Fonseca et al., 2006; Fabi et al., 2007). Asociado a esto, se ven afectados los más importantes parámetros de calidad del producto como son la textura, la microbiología, el olor, el sabor, entre otros (Martins et al., 2013; Agudelo, 2014). A bajas temperaturas se puede llegar también a una alteración celular por incapacidad de las enzimas asociadas a las membranas mitocondriales de metabolizar los productos de la glicolisis (Kader, 1994).

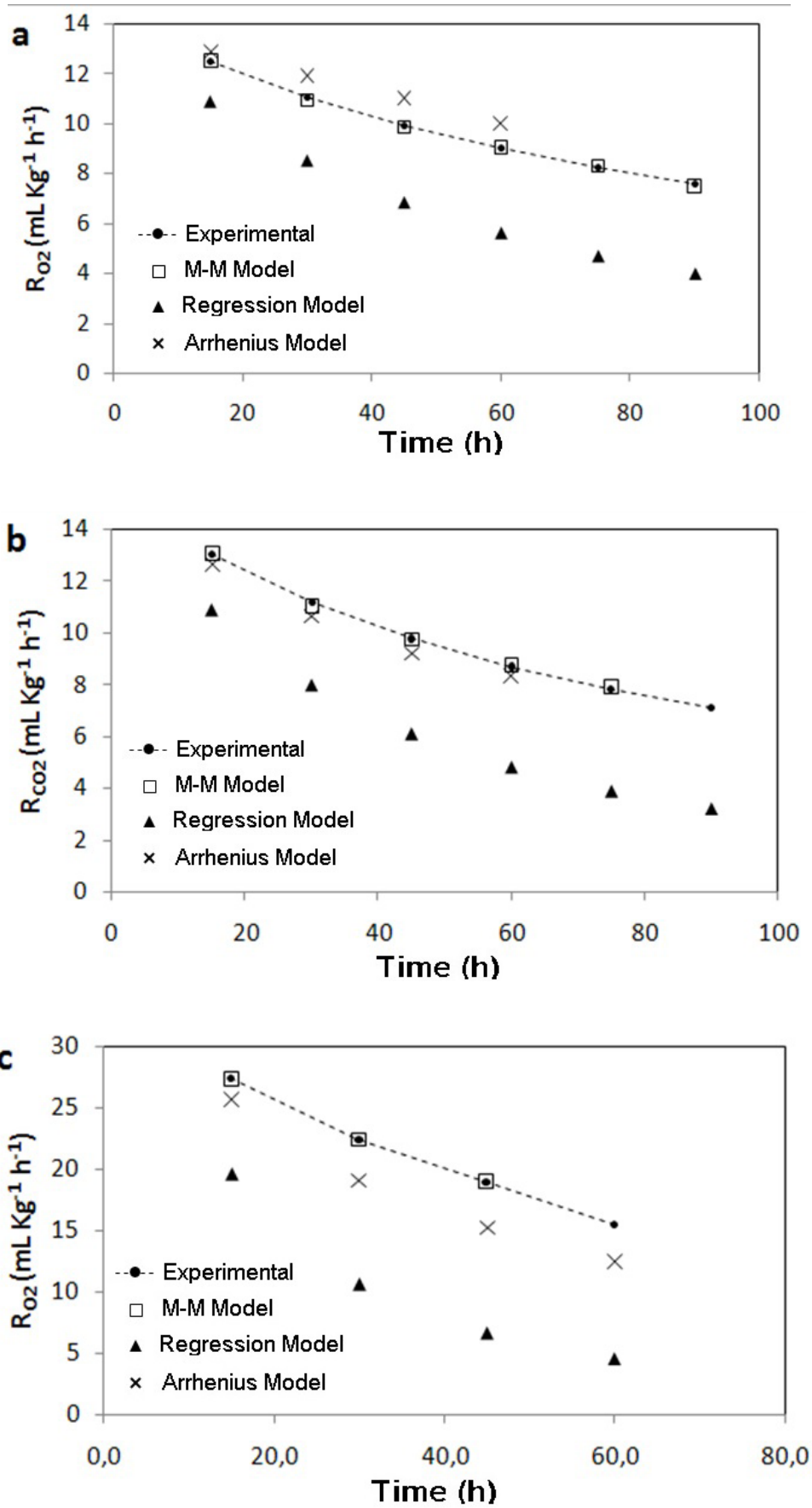
Cinética de Respiración del Mango entero

Modelo de Regresión

Los coeficientes de la Tabla 1, se reemplazaron en las ecuaciones (5) y (6) para obtener las tasas de respiración predichas por el modelo de regresión que se presentan en la Figura 2. En la cual se observa que este modelo no tiene un buen ajuste para ninguna de las temperaturas de trabajo. El parámetro *b* se ve más afectado por la temperatura que el *a*, como ya ha sido reportado en estudios previos (Mahajan y Goswami 2001; Ravindra & Goswami 2008; Agudelo et al., 2016).

Modelo de Michaelis-Menten

En la Tabla 2 se presentan los parámetros de la ecuación de Michaelis-Menten, con su respectivo valor de R², estimados con las ecuaciones (11) y (12) y en la Figura 2 el comportamiento gráfico de los valores de velocidad de respiración (R_{CO₂} y R_{O₂}) predichos con estos parámetros. El contraste de los valores predichos contra experimentales en la Figura 2, así como los valores de R² para estos parámetros, señalan el excelente ajuste obtenido con este modelo. Este modelo presenta un ajuste mucho mejor que el modelo de regresión (Ecuaciones 7 y 8) que se discutió anteriormente.



continua.....

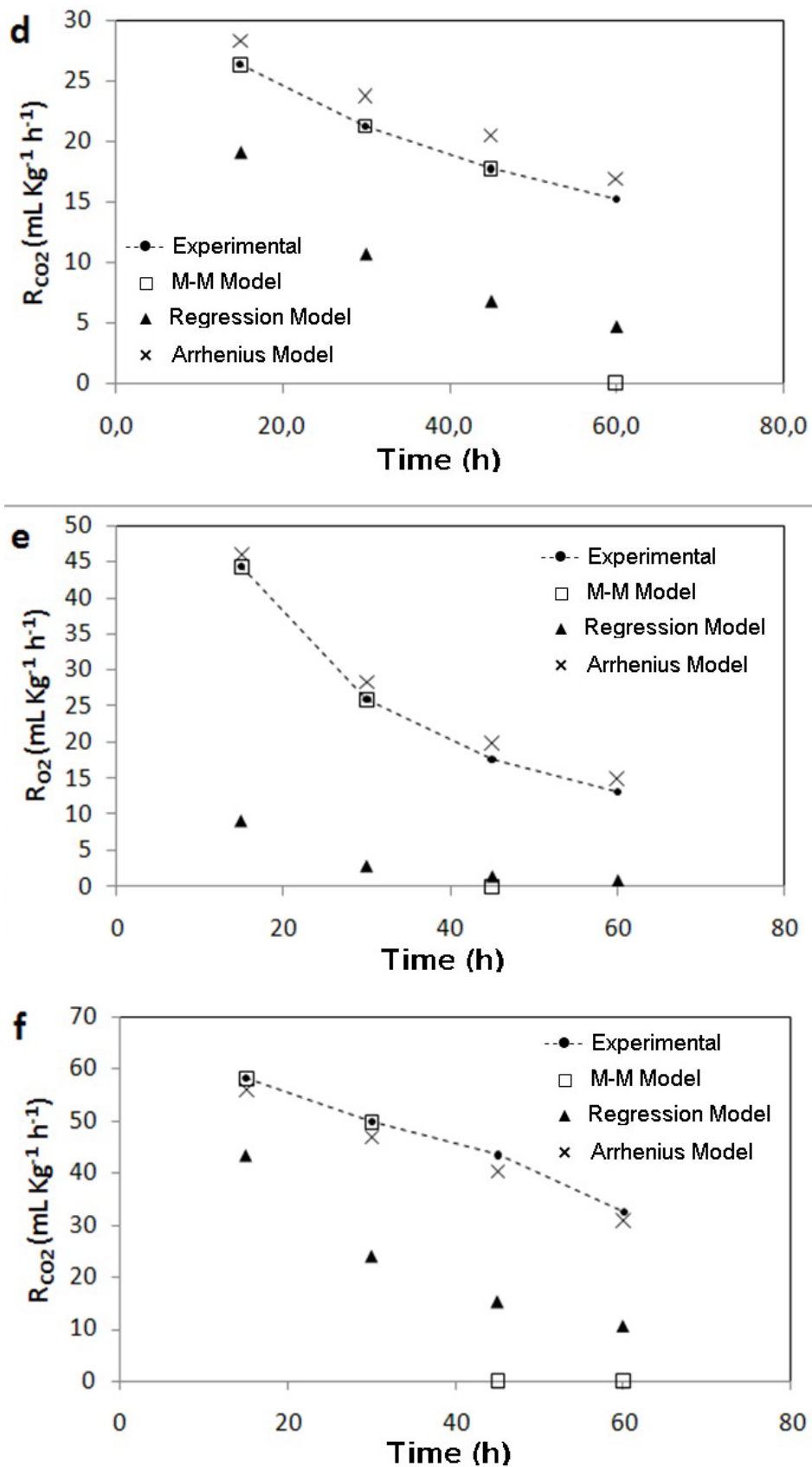


Figura 2. Velocidad de consumo de O_2 (R_{O_2}) a 4°C (a), 25°C (c) y 30°C (e) y velocidad de producción del CO_2 (R_{CO_2}) a 4°C (b), 25°C (d) y 30°C (f) del mango entero.

Tabla 2. Parámetros del modelo de Michaelis-Menten para predecir la velocidad de respiración de mango entero a diferentes temperaturas empacado en sistema cerrado.

Parámetro	Temperatura (°C)					
	4		25		35	
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂
V _m (mL kg ⁻¹ h ⁻¹)	16.7016	19.2478	42.2357	42.7416	63.3520	76.6847
K _m (% O ₂)	1.4674	2.1392	0.3368	0.3495	0.3000	0.0011
K _i (% CO ₂)	19.9429	14.2913	15.7995	13.7906	65.4297	66.3915
R ²	0.9979	0.9980	0.9035	0.9291	0.9052	0.927

El análisis de los datos de la Tabla 2 con base en la forma de las ecuaciones (9) y (10), permite observar el efecto que tienen los gases sobre las velocidades de producción CO₂ y de consumo O₂. A bajas concentraciones de CO₂ y altas concentraciones de O₂, ambas velocidades de respiración son prácticamente independientes de las concentraciones de los gases, debido a la diferencia entre los valores de K_m con respecto a las concentraciones de oxígeno, que hacen que el denominador de las ecuaciones (9) y (10), dependa prácticamente solo de la concentración de oxígeno, ya que los valores de K_i anulan el efecto del CO₂ cuando este está en bajas concentraciones. Por otro lado, cuando la concentración oxígeno disminuye y la de CO₂ aumenta, el denominador de ambas ecuaciones se hace más sensible a la concentración de CO₂, máxime cuando el valor de K_i disminuye con la temperatura. Por tal razón, con el incremento de CO₂ y descenso de O₂, las velocidades de producción de CO₂ y consumo de O₂ dependen de la concentración de CO₂, reacciones en las cuales el CO₂ actúa como un inhibidor. Este comportamiento puede llegar hasta un punto desfavorable para la fruta, dado que altas concentraciones de CO₂ y muy bajas concentraciones de O₂ pueden provocar que la respiración cambie de aeróbica a anaeróbica, propiciando la formación de productos de fermentación como acetaldehído y etanol (Angós et al., 2008; Sandhya, 2010; Martins y Resende, 2013).

En la Tabla 2 se observa como los parámetros de M-M se ven afectados por la temperatura. En tal sentido, V_m que se relaciona con el punto de saturación de la enzima (Preetinder et al, 2011), incrementa con la temperatura para ambos gases. En cuanto a los valores de K_m , se ven reducidos con el incremento de temperatura, lo que indica que a mayor temperatura se requiere menor concentración del sustrato para alcanzar $\frac{1}{2} V_m$, es decir una mayor afinidad de la enzima por el sustrato (Preetinder et al, 2011). Por otro lado, al aumentar la temperatura los valores de K_i se incrementan, con lo cual el efecto inhibitor del CO₂, se ve reducido (Ecuaciones 9 y 10).

Modelamiento la velocidad de respiración en función de la temperatura

En la Tabla 3 se presentan los valores de la energía de activación y el factor pre-exponencial para R_{O₂} y R_{CO₂} experimentales, ajustados con la *Ecuación de Arrhenius* (Ecuación 13), entre 4-35°C, en función del tiempo. Es evidente que el valor de estos parámetros depende del momento en que se calculen, es decir de la concentración de gases puntual que se tenga en ese momento en el sistema. Estos parámetros fueron usados para establecer las velocidades de respiración en función del tiempo que se presentan en la Figura 2. Los valores de R² indican que el ajuste de los datos va decayendo a medida que el tiempo transcurre y las concentraciones de los gases se van alejando de sus valores iniciales. En tal sentido el valor más confiable sería el que se toma a las 15 horas de iniciado, lo cual representa una limitante para el uso del modelo en el tiempo. Algo similar sucede con la piña cortada y el aumento de la temperatura (Benítez et al., 2012).

Table 3. Parámetros de la ecuación de Arrhenius para los datos experimentales entre 4-35°C, en función del tiempo.

Tiempo (h)	Ea (kJ/g mol)		Rp		R ²	
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂
15	29,1045	34,0992	25,3306	27,9186	0,9921	0,9931
30	19,8271	33,9797	18,8971	23,4131	0,9041	0,9830
45	13,6091	33,8933	15,0882	20,1703	0,7006	0,9732
60	9,2688	30,0815	12,3714	16,7036	0,5186	0,9820

En la Tabla 4, se presentan los valores de la energía de activación y el factor pre-exponencial determinados con el Modelo Global (Ecuaciones 14 y 15), así como los valores promedio de los datos obtenidos con la *Ecuación de Arrhenius*. Se observa una desviación importante de los valores obtenidos con el modelo global con respecto a los promedios de la ecuación tipo Arrhenius, lo cual es debido a que el modelo de superficie tiene menor manipulación matemática, lo que conlleva a menos errores por los procedimientos matemáticos utilizados (Iqbal et al. 2009; Agudelo et al., 2016).

El análisis de los valores de *Ea* para los dos modelos, permite observar que la reacción de consumo de oxígeno requiere una cantidad mínima de energía para iniciar, menor que la reacción de producción de CO₂. Además, los valores de la energía de activación están dentro de los valores normales para frutas, que van desde 29 hasta 93 kJ g⁻¹ mol⁻¹ (Benítez et al., 2012).

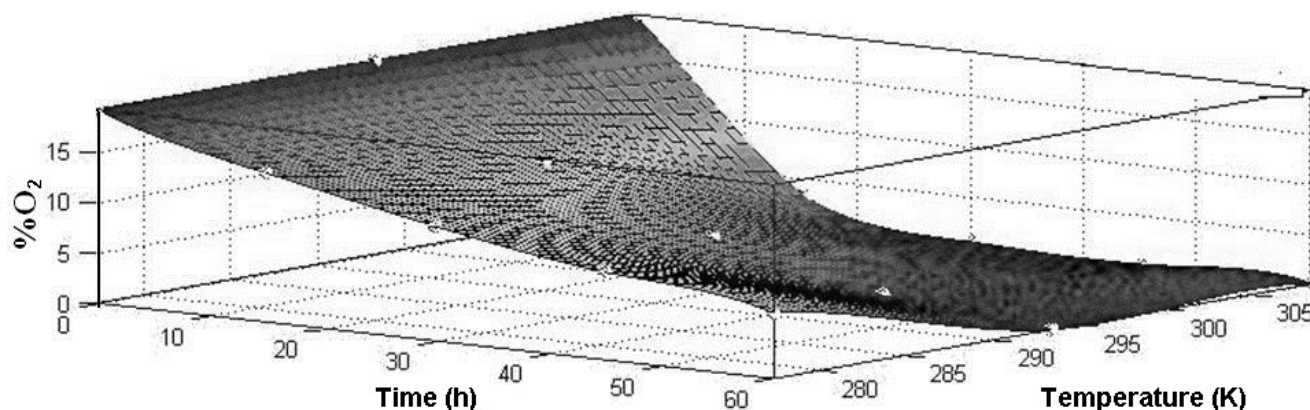
Tabla 4. Energía de activación para la respiración de mango entero en sistema cerrado, para los datos de la ecuación de Arrhenius se especifica el promedio.

	Arrhenius (Exp.)		Modelo Global	
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂
<i>Ea</i> (kJ/g mol)	17,9524	33,0134	12,69	41,01
<i>Rp</i>	17,9218	22,0514	14,15	17,1
R ²			0,7038	0,9077

Efecto de la temperatura y el tiempo sobre la concentración de gases: Modelo matemático global

En las Figuras 3 y 4, se observan las superficies que representan los datos experimentales en función del

tiempo y de la temperatura para el consumo de O₂ y la producción de CO₂, respectivamente, en el mango entero. En ellas se observa como con el aumento de la temperatura, se incrementa el consumo de O₂ y la producción de CO₂.

**Figura 3.** Comportamiento experimental del consumo de O₂ en función de tiempo y las temperaturas de almacenamiento, para mango entero en sistema cerrado.

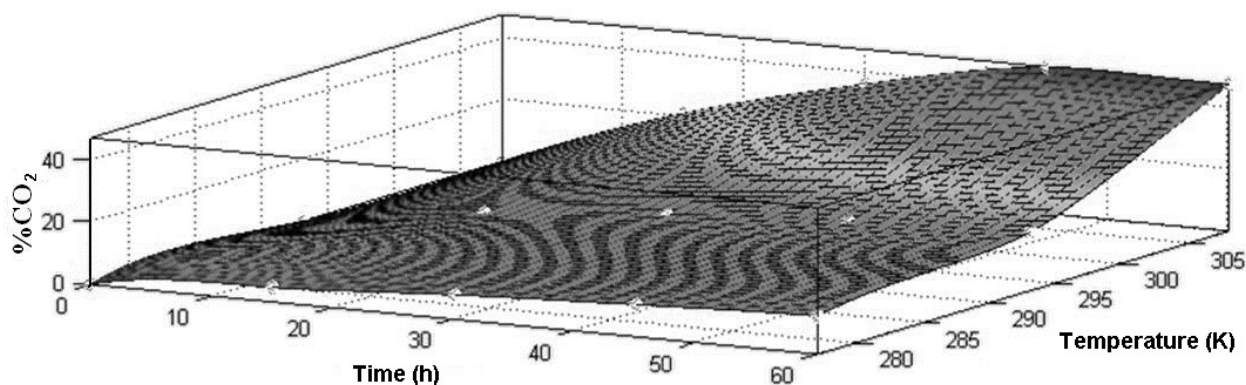


Figura 4. Comportamiento experimental de la producción de CO_2 en función de tiempo y las temperaturas de almacenamiento para mango entero en sistema cerrado.

Mediante el uso del modelo global, ecuaciones (14) y (15), se puede predecir la concentración de los gases en el rango de tiempo y temperatura ($4 - 35^\circ\text{C}$), para el O_2 (Figura 5) y para el CO_2 (Figura 6). Las líneas en la parte inferior (líneas de contorno) indican el valor constante de $\%\text{O}_2$ y $\%\text{CO}_2$ para las combinaciones de tiempo y temperatura.

La comparación de las gráficas en las Figuras 3-5 y 4-6, y los valores de los R^2 , para el modelo global en la Tabla 3, permiten apreciar el ajuste logrado con este modelo.

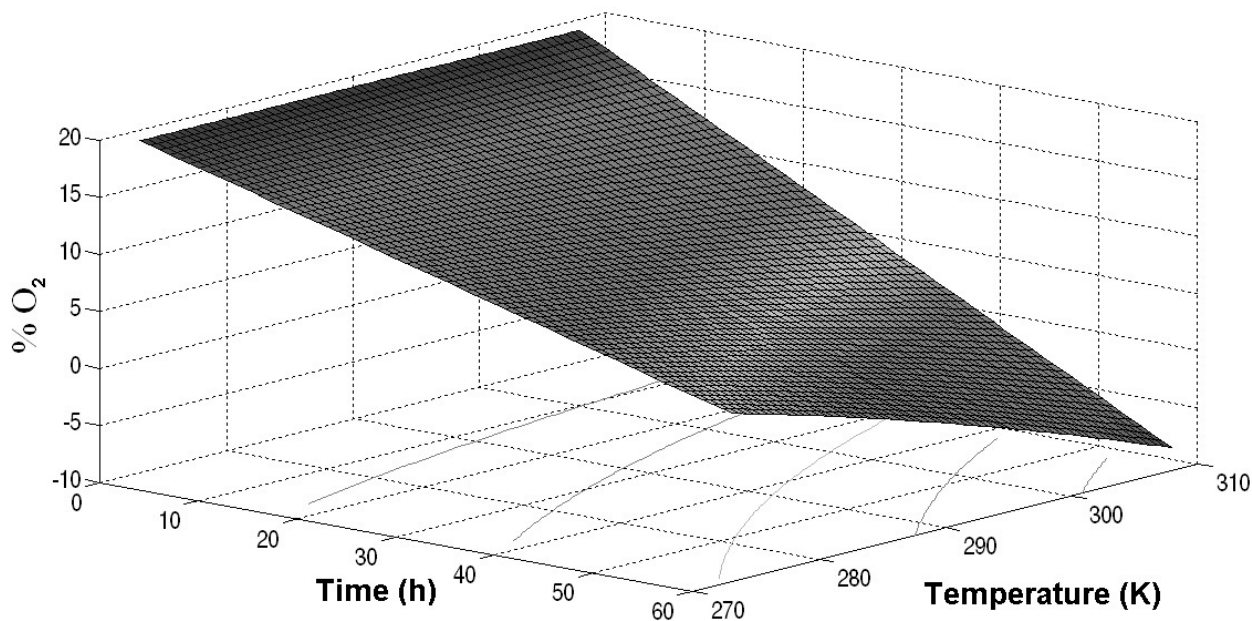


Figura 5. Comportamiento predicho para el consumo de O_2 , en función de tiempo y temperatura, determinado con los datos de la Tabla 8 y la ecuación (13) para mango entero.

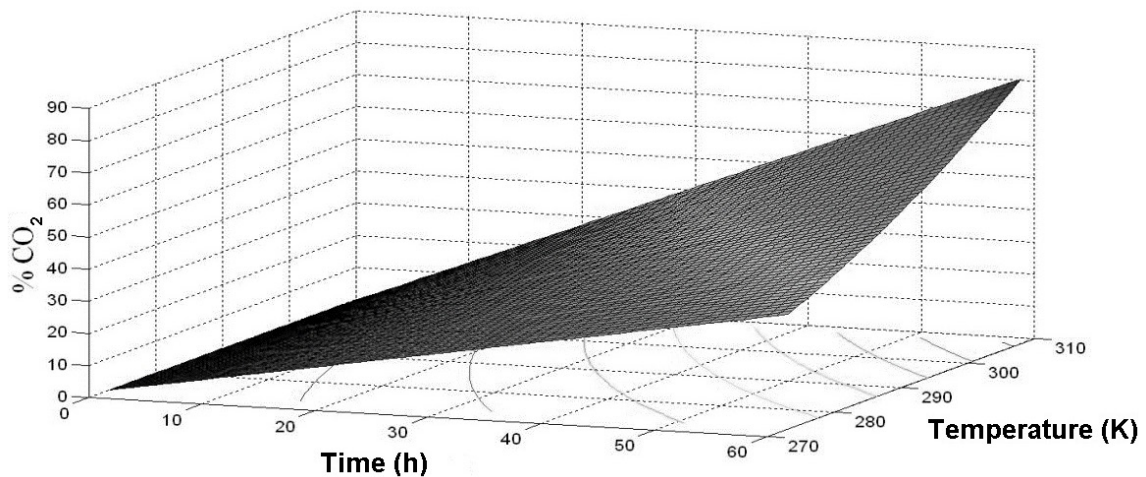


Figura 6. Comportamiento predicho para la producción de CO_2 , en función de tiempo y temperatura, determinado con los datos de la Tabla 8 y la ecuación (14) para mango entero.

La comparación de los resultados del ajuste del modelo de regresión (Tabla 1) y el modelo global (Tabla 3), para predecir el comportamiento de los gases indican un ajuste superior para el modelo de regresión, sin embargo, se debe tener en consideración que el modelo global es un modelo semi-empírico, mientras que el modelo de regresión es un modelo completamente empírico. Por lo que el modelo de regresión solo es útil si se va a trabajar en las condiciones exactas en las cuales se determinó, mientras que el modelo global cubre todo un rango tanto de temperaturas como de tiempos, lo que hace que sea un modelo más robusto. Además, por ser un modelo semi-empírico puede ser útil para hacer interpolaciones en el rango de trabajo, que cubre las temperaturas más convencionales para el almacenamiento del mango.

Por otro lado, el modelo de M-M es claramente superior al modelo de regresión para predecir las velocidades de respiración, en función del tiempo. Además, el modelo de M-M por ser un modelo semi-empírico es más robusto.

En cuanto a los ajustes de modelos para predecir el efecto de la temperatura, el modelo de Arrhenius es útil para predecir la concentración de gases en un momento dado, mientras que el modelo global la puede calcular en el transcurso del tiempo, ambas en función de la temperatura, por lo que es evidente la utilidad del modelo global.

Conclusiones

La velocidad de respiración del mango entero en sistema cerrado puede ser predicha por medio de modelos de regresión y de modelos tipo Michaelis-Menten.

En este sistema la velocidad de respiración del mango entero presenta una dependencia directa con la temperatura, la cual puede ser predicha por una ecuación de tipo Arrhenius o por un modelo global que incluya el comportamiento en función del tiempo.

Agradecimientos

Los realizadores del presente trabajo agradecen al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) en la Universidad de Antioquia, por el apoyo financiero a través de la Estrategia de Sostenibilidad. Así mismo a la Fundación INTAL por facilitar las instalaciones.

Referencias

- AGUDELO, C. Modelación de la tasa de respiración en mango mínimamente procesado. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, Medellín, v.67, p.341-343, 2014. Suplemento 2.
- AGUDELO, C.; RESTREPO, C.; ZAPATA J. E. Respiration kinetic of mango (*Mangifera indica* L.) as function of storage temperature. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, La Plata, v.69, p. 7985-7995, 2016
- ANGÓS, I.; VÍRSEDA, P.; FERNÁNDEZ, T. Control of respiration and color modification on minimally processed potatoes by means of low and high O_2/CO_2 atmospheres. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v.48, p.422-430, 2008.
- ARTÉS-HERNÁNDEZ, F.; CONESA, A.; ARTÉS, F. Minimally fresh processed pepper under different kind of cuts. **Acta Horticulturae**, Leuven, v.857, p.25-30, 2010.

- BENÍTEZ, S.; CHIUMENTI, M.; SEPULCRE, F.; ACHAERANDIO, L.; PUJOLÁ, M. Modeling the effect of storage temperature on the respiration rate and texture of fresh cut pineapple. **Journal of Food Engineering**, London, v.113, p.527-533, 2012.
- BHANDE, S.D.; RAVINDRA, M.R.; GOSWAMI, T.K. Respiration rate of banana fruit under aerobic conditions at different storage temperature. **Journal of Food Engineering**, London, v.87, p.116-123, 2008.
- CASTELLANOS, D.; ALGECIRA, N.; VILLOTA, C. Evaluación de la calidad en almacenamiento de banano bocadillo (*Musa acuminata* AA) en atmósferas modificadas. **Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha**, Mexico, v.13, n.1, p.1-8, 2012.
- FABI, J.P.; CORDENUNSI, B.R.; BARRETO, G.P.M.; MERCADANTE, A.Z.; LAJOLO, F.M.; NASCIMENTO, J.R.O. Papaya fruit ripening: response to ethylene and 1-Methylcyclopropene (1-MCP). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v.55, p.6118-6123, 2007.
- FONSECA, M.J.O.; LEAL, N.R.; CENCI, S.A.; CECON, P.R.; BRESSANSMITH, R.E.; SOARES, A.G. Emission of ethylene and CO₂ in 'Sunrise Solo' and 'Golden' papaya. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.28, n.2, p.322-324, 2006.
- FONSECA, S.C.; OLIVEIRA, F.A.R.; BRECHT, J.K. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. **Journal of Food Engineering**, London, v.52, p.99-119, 2002.
- GOMES, M.; BEAUDRY, R.; ALMEIDA, D.; MALCATA, F. Modelling respiration of packaged fresh-cut 'Rocha' pear as affected by oxygen concentration and temperature. **Journal of Food Engineering**, London, v.96, p.74-79, 2010.
- GUEVARA, J.C.; YAHIA, E.M.; BEAUDRY, R.M.; CEDENO, L. Modeling the influence of temperature and relative humidity on respiration rate of prickly pear cactus cladodes. **Postharvest Biology and Technology**, New York, v.41, p.260-265, 2006.
- HAGGER, P.E.; LEE D.S.; YAM, K.L. Application of an enzyme kinetics based respiration model to closed system experiments for fresh produce. **Journal of Food Process Engineering**, Oxford, v.15, p.143-157, 1992.
- HEYDARI, A.; K. SHAYESTEH, K.; EGHBALIFAM, N.; BORDBAR, H. Studies on the respiration rate of banana fruit based on enzyme kinetics. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v.12, n.1, p.145-149, 2010.
- IQBAL, T.; RODRIGUES, F.; MAHAJAN, P.; KERRY, J. Mathematical modelling of the influence of temperature and gas composition on the respiration rate of shredded carrots. **Journal of Food Engineering**, London, v.91, p.325-332, 2009.
- JACXSENS, L.; DEVLIEGHERE, F.; DEBEVERE, J. Validation of a systematic approach to design equilibrium modified atmosphere packages for fresh-cut produce. **LWT – Food Science and Technology**, Amsterdam, v.32, p.425-432, 1999.
- KADER, A. Modified and controlled atmosphere storage of tropical fruits. **Australian Centre for International Agricultural Research Proceedings**, Canberra, v.50, p.239-249, 1994.
- KAN, J.; WANG, H.; JIN, C.; XIE, H. Changes of reactive oxygen species and related enzymes in mitochondria respiratory metabolism during the ripening of peach fruit. **Agricultural Sciences in China**, Beijing, v.9, p.138-146, 2010.
- LEE, D.; SONG, Y.; YAM, K. Application of an enzyme kinetics based respiration model to permeable system experiment of fresh produce. **Journal of Food Engineering**, London, v.27, p.297-310, 1996.
- LUO, Z.; CHEN, C.; XIE, J. Effect of salicylic acid treatment on alleviating postharvest chilling injury of 'Qingnai' plum fruit. **Postharvest Biology and Technology**, New York, v.62, p.115-120, 2011.
- LURIE, S.; CRISOSTO, C. Chilling injury in peach and nectarine. **Postharvest Biology and Technology**, New York, v.37, p.195-208, 2005.
- MAHAJAN, P.; GOSWAMI, T.K. Enzyme Kinetics Based Modelling of Respiration Rate for Apple. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.79, p.399-406, 2001.
- MARTINS, D.R.; RESENDE, E.D. Quality of golden papaya stored under controlled atmosphere conditions. **Food Science and Technology International**, Ibaraki, v.19, p.473-481, 2013.

- MATTIUZ, B.; DURIGAN, J.F. Effect of mechanical injuries on respiratory process and chemicals parameters of 'paluma' and 'pedro sato' guavas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.23, n.2, p. 282-287, 2001.
- NGARMSAK, M.; NGARMSAK, T.; OORAIKUL, B.; DELAQUIS, P.J.; TOIVONEN, P.M.; MAZZA G. Effect of sanitation treatments with heated, chlorinated water on the microbiology of fresh-cut Thai mangoes. **Acta Horticulturae**, Leuven, v.682, p.1895-1899, 2005.
- NICOLAÏ, B.; HERTOOG, M.; HO, Q.; VERLINDEN, B. Gas exchange modeling. In: YAHIA E. **Atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities**. New York: CRC Press, 2009. p.93-108.
- NICOLAÏ, B.; LAMMERTYN, J.; SCHOTSMANS, W.; VERLINDEN, B. **Gas exchange properties of fruits and vegetables. Engineering properties of foods**. 3rd ed. London: Taylor & Francis Group, 2005.
- PACHECO, A. L. V.; SCHULZ, K.; VIERA, G.; DE FREITAS, G. B.; CECON, P. R. Physical-chemical quality of mango 'ubá' (*Mangifera Indica* L.) fruits submitted to impact mechanical damage at harvest. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.39, n1., p.1-7, 2017.
- PREETINDER, K.; DEEPAK, R.R.; SHASHI, P. Nonlinear estimation of respiratory dynamics of fresh-cut spinach (*spinacia oleracea*) based on enzyme kinetics. **Journal of Food Process Engineering**, Oxford, v.34, p.2137-2155, 2011.
- QIN, G. Z.; WANG, Q.; LIU, J.; LI, B.Q.; TIAN, S.P. Proteomic analysis of changes in mitochondrial protein expression during fruit senescence. **Proteomics**, Weihen, v.9, p.4241-4253, 2009.
- RAI, D.; PAUL, S. Transient state in-pack respiration rates of mushroom under modified atmosphere packaging based on enzyme kinetics. **Biosystems Engineering**, New York, v.98, p.319-326, 2007.
- RAVINDRA, M.R.; GOSWAMI, T.K. Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. **Biosystems Engineering**, New York, v.99, p.239-48, 2008.
- SANDHYA, S. Review. Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. **LWT - Food Science and Technology**, New York, v.43, p.381-392, 2010.
- SELCUK, N.; ERKAN, M. The effects of modified and palliflex controlled atmosphere storage on postharvest quality and composition of 'Istanbul' medlar fruit. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v.99, p.9-19, 2015.
- TORRIERI, E.; PERONE, N.; CAVELLA, S.; MASI, P. Modelling the respiration rate of minimally processed broccoli (*Brassica rapa* var. *sylvestris*) for modified atmosphere package design. **Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v.45, p.2186-2193, 2010.
- WAGHMARE, R. B.; MAHAJAN, P. V.; ANNAPURE, U. S. Modelling the effect of time and temperature on respiration rate of selected fresh-cut produce. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v.80, p.25-30, 2013.
- ZAPATA, J.; CARVAJAL, L.; OSPINA, N. Aplicación de métodos combinados para la conservación de papaya hawiana (*Carica papaya*) cortada en láminas. **Alimentación Equipos y Tecnología**, Madrid, v.190, p.113-119, 2004.