



Industrial Data

ISSN: 1560-9146

[iifi@unmsm.edu.pe](mailto:iifi@unmsm.edu.pe)

Universidad Nacional Mayor de San  
Marcos  
Perú

Najarro Barrientos, Juan; Tinoco Gómez, Oscar; Huari Evangelista, Félix  
Simulación de la actividad respiratoria en pos-cosecha de plátano (*Musa cavendishii*) bajo  
atmósfera modificada para mejora del tiempo de almacenamiento  
Industrial Data, vol. 19, núm. 2, julio-diciembre, 2016, pp. 96-103  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
Lima, Perú

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81649428012>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](http://redalyc.org)

[redalyc.org](http://redalyc.org)

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Simulación de la actividad respiratoria en pos-cosecha de plátano (*Musa cavendishii*) bajo atmósfera modificada para mejora del tiempo de almacenamiento

RECIBIDO: 24/05/2016

ACEPTADO: 14/11/2016

JUAN NAJARRO BARRIENTOS\*

OSCAR TINOCO GÓMEZ\*\*

FÉLIX HUARI EVANGELISTA\*\*\*

## RESUMEN

La investigación consistió en la aplicación de métodos numéricos capaces de describir las curvas típicas de consumo de  $O_2$  y producción de  $CO_2$  de frutas empacadas en atmósfera modificada, considerando las constantes de Michaelis-Menten durante la respiración. Mediante el lenguaje Visual Basic se elaboró un programa, cuyos resultados fueron validados aplicando datos experimentales obtenidos por Song *et al.* (1992) y valores experimentales obtenidos en el laboratorio de Análisis de alimentos de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad del Callao. Llegando a las siguientes conclusiones: Las Ecuaciones Diferenciales ordinarias facilitan la cuantificación de oxígeno residual y dióxido de carbono dentro del empaque de vegetales bajo atmósfera modificada. El dióxido de carbono es estable a partir de las 30 horas de almacenamiento del plátano. El programa elaborado tuvo comportamiento satisfactorio para el fruto del plátano.

**Palabras clave:** simulación, actividad respiratoria pos-cosecha, plátano

SIMULATION OF RESPIRATORY ACTIVITY IN POST-HARVEST OF BANANA (*MUSA CAVENDISHII*) MODIFIED ATMOSPHERE FOR IMPROVEMENT UNDER THE SHELF

## ABSTRACT

The research involves the application of numerical methods capable of describing the typical curves of  $O_2$  consumption and  $CO_2$  production of fruit packed in modified atmosphere, considering the Michaelis-Menten constant during breathing. Through language Visual Basic program, whose results were validated using experimental data obtained by Song *et al.* (1992) and experimental values obtained in the laboratory of Food Analysis of the Faculty of Chemical Engineering and Metallurgy. Reached the following conclusions: Ordinary Differential Equations facilitate quantification of residual oxygen and carbon dioxide within the packaging of vegetables under modified atmosphere. Carbon dioxide is stable after 30 hours storage banana. The program was developed satisfactory performance for the banana fruit.

**Keywords:** simulation, respiratory activity postharvest, banana

## 1. INTRODUCCIÓN

Las frutas y hortalizas frescas continúan respirando después de ser recolectadas y, en consecuencia, cualquier empaquetado posterior debe tener en cuenta esta actividad respiratoria. La respiración es un fenómeno bioquímico muy complejo, según el cual los carbohidratos, polisacáridos, ácidos orgánicos y otras fuentes de energía son metabolizados en moléculas más simples con producción de calor, estos cambios generan las modificaciones en la calidad del producto. El mantenimiento de la calidad de un producto fresco, depende de varios factores entre los que destacan las condiciones higiénicas de procesado y del producto, el mantenimiento de la cadena del frío y un apropiado diseño del empaque en atmósfera modificada. Para un adecuado diseño del empaque para la conservación en atmósfera modificada, resulta muy conveniente lograr un modelo matemático para prever la evolución de la atmósfera que tenga en cuenta la temperatura y las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$ .

La mayor parte de los métodos empleados para medir la intensidad de la respiración requieren determinaciones cuantitativas del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) producido o del oxígeno consumido ( $O_2$ ). El uso de simuladores en la industria alimentaria facilita la obtención de resultados mediáticos, a partir del conocimiento de las características del empaque, características respiratorias del producto (constantes de respiración de Michaelis-Menten), cantidad y condiciones de almacenamiento ( $O_2$  y  $CO_2$  dentro del empaque).

Al respecto, Hinojosa y Escalona (2011) precisan que el envasado en atmósfera modificada (EAM) es una herramienta utilizada en la industria alimentaria, para aumentar las concentraciones de  $CO_2$  y reducir las de  $O_2$ . Su aplicación permite disminuir los desórdenes fenológicos y pudriciones.

\* Ingeniero en Industrias Alimentarias, Egresado de la Maestría Logística y Operaciones de la FII, UNMSM. E-mail: [juan.najarro@unmsm.edu.pe](mailto:juan.najarro@unmsm.edu.pe)

\*\* Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Docente Asociado de la FII, UNMSM. E-mail: [otinocog@gmail.com](mailto:otinocog@gmail.com)

\*\*\* Ingeniero Industrial, Docente Asociado de la FII, UNMSM. E-mail: [felix.huari@industrial.unmsm.pe](mailto:felix.huari@industrial.unmsm.pe)

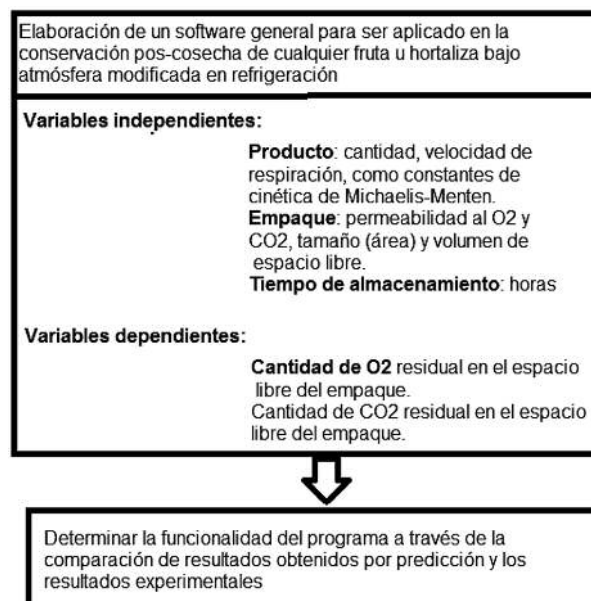
## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Como materia prima se usó plátano variedad 'Moquicho o Biscochito' en estado de madurez fisiológica. El trabajo fue estructurado y organizado a través de una serie de fases con una secuencia metódica que abarcaron las etapas de conceptualización, el modelado matemático, elaboración del programa computacional, teniendo en cuenta las variables físicas (respiración, cantidad de producto, permeabilidad del empaque) para la aplicación en conservación pos-cosecha bajo atmósfera modificada a temperatura constante de refrigeración de los vegetales. (Ver Figura 1).

El diseño experimental consistió primero elaborar un programa general para ser aplicado en pos-cosecha de frutas y hortalizas, considerando las variables de tipo de empaque usado (características del empaque), producto a conservar (cantidad, velocidad de respiración en función de las constantes de Michaelis-Menten) y considerando la composición del aire en atmósfera modificada bajo refrigeración, y finalmente ver la funcionalidad del programa con datos experimentales.

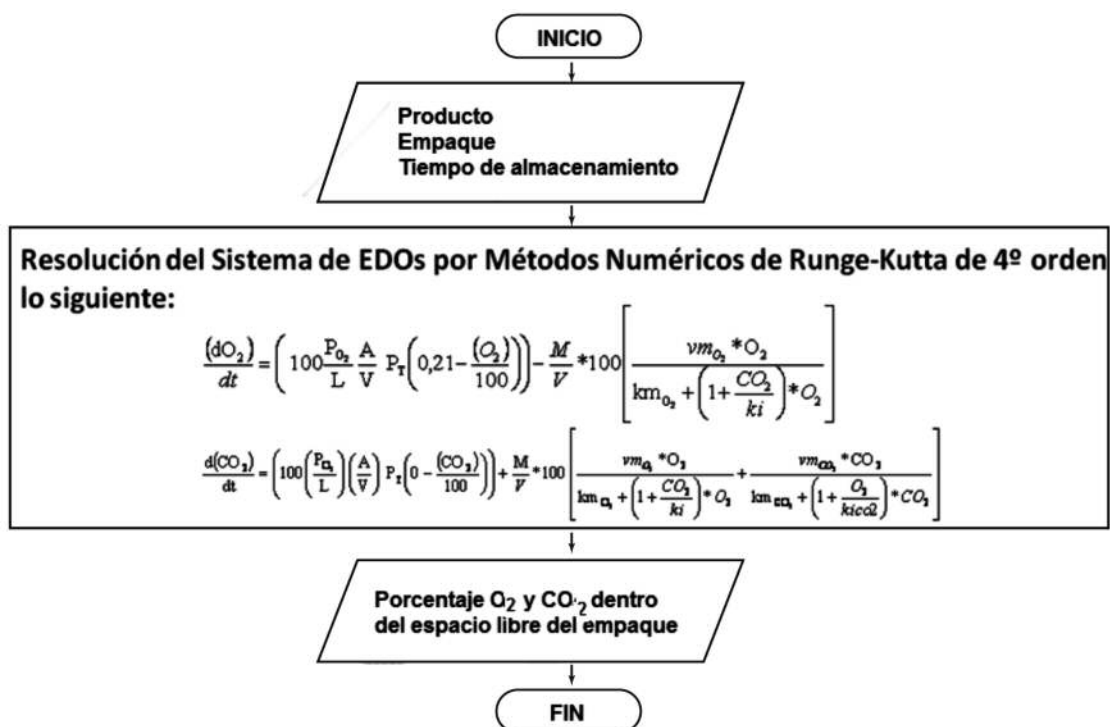
En la Figura 2 se ilustra el diseño experimental del programa para la estimación de consumo de O<sub>2</sub> y producción de CO<sub>2</sub>.

Figura 1. Esquema de investigación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Diagrama de Flujo.



Fuente: Elaboración propia.

### Estimación de cálculo de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en envasado de atmósfera modificada

El mantenimiento de la calidad de un producto fresco, depende de varios factores entre los que destacan las condiciones higiénicas de procesado y del producto, el mantenimiento de la cadena del frío y un apropiado diseño del empaque en atmósfera modificada. Para un adecuado diseño del empaque para la conservación en atmósfera modificada, resulta muy conveniente lograr un modelo matemático para prever la evolución de la atmósfera que tenga en cuenta la temperatura y las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Por ello el objetivo de este trabajo es predecir la actividad respiratoria en función de la temperatura, concentraciones de O<sub>2</sub> y del CO<sub>2</sub>. Es necesario recurrir a la ecuación de Michaelis-Menten para describir dicho comportamiento respiratorio porque dicha ecuación se ajusta bien a los datos experimentales obtenidos para las actividades respiratorias de numerosos productos hortofrutícolas (Fonseca et al., 2002).

### Estimación del O<sub>2</sub> consumo por el producto en el tiempo de almacenamiento

Conocido los valores de las características del envase: Área del empaque (A), permeabilidad al O<sub>2</sub> del empaque (pO<sub>2</sub>/L), y las características de la fruta: Cantidad dentro del empaque (M), constantes de Michaelis-Menten de respiración de la fruta y éstas se reemplazaron en el modelo matemático

En esta ecuación diferencial ordinaria (dO<sub>2</sub>/dt) se simuló utilizando el procedimiento iterativo, como el método numérico de Runge-Kutta de 4 orden, y se calculó el valor de O<sub>2</sub> (%) para los diferentes tiempos (horas) para ello consideramos constantes los demás valores.

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \left( 100 \frac{P_{O_2}}{L} \frac{A}{V} P_T \left( 0,21 - \frac{(O_2)}{100} \right) \right) - \frac{M}{V} * 100 \left[ \frac{vm_{O_2} * O_2}{km_{O_2} + \left( 1 + \frac{CO_2}{ki} \right) * O_2} \right]$$

Donde:

Po<sub>2</sub> /L = Permeabilidad al oxígeno (mL/pulg<sup>2</sup> h atm)

A = Área del empaque (pulg<sup>2</sup>)

M = Cantidad de producto dentro del empaque (Kg)

Vmo<sub>2</sub>: Velocidad de respiración máxima de O<sub>2</sub> (consumo)

Vmco<sub>2</sub>: Velocidad de producción máxima de CO<sub>2</sub> (emisión)

KmO<sub>2</sub>: Constante de respiración de Michaelis-Menten (%).

Ki: Constante de inhibición de oxígeno de Michaelis-Menten (%).

KiCO<sub>2</sub>: Constante de inhibición de CO<sub>2</sub> de Michaelis-Menten (%).

PT: Presión total (atm) (fuera del envase = dentro del envase) cuando es envasado a medio ambiente.

O<sub>2</sub> = porcentaje de O<sub>2</sub> dentro del envase.

CO<sub>2</sub> = porcentaje de CO<sub>2</sub> dentro del envase.

V = Volumen del espacio libre del empaque (mL)

### Estimación de producción de CO<sub>2</sub> en el tiempo de almacenamiento de frutas

Conocido los valores de las características del envase: Área del empaque (A), permeabilidad al CO<sub>2</sub> del empaque (pCO<sub>2</sub>/L), y las características de la fruta: Cantidad dentro del empaque (M), Constantes de Michaelis-Menten de respiración de la fruta y éstas se reemplazaron en el modelo matemático.

$$\frac{d(CO_2)}{dt} = \left( 100 \left( \frac{P_{CO_2}}{L} \right) \left( \frac{A}{V} \right) P_T \left( 0 - \frac{(CO_2)}{100} \right) \right) + \frac{M}{V} * 100 \left[ \frac{vm_{CO_2} * O_2}{km_{O_2} + \left( 1 + \frac{CO_2}{ki} \right) * O_2} + \frac{vm_{CO_2}}{\left( 1 + \frac{O_2}{ki} + \frac{CO_2}{kico} \right) * O_2 + 1} \right]$$

En esta ecuación diferencial ordinaria (dCO<sub>2</sub>/dt) se realizó la simulación a través del procedimiento iterativo, como el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden, y se calculó el valor de CO<sub>2</sub> (%) para los diferentes tiempos (horas) de almacenamiento para ello se consideró constantes los demás valores.

Donde:

Pco<sub>2</sub>/L = Permeabilidad al oxígeno (mL/pulg<sup>2</sup> h atm)

A = Área del empaque (pulg<sup>2</sup>)

M = Cantidad de producto dentro del empaque (Kg)

Vmo<sub>2</sub>: Velocidad de respiración máxima de O<sub>2</sub> (consumo)

Vmco<sub>2</sub>: Velocidad de producción máxima de CO<sub>2</sub> (emisión)

KmO<sub>2</sub>: Constante de respiración de Michaelis-Menten (%).

Ki: Constante de inhibición de oxígeno de Michaelis-Menten (%).

KiCO<sub>2</sub>: Constante de inhibición de CO<sub>2</sub> de Michaelis-Menten (%).

PT: Presión total (atm) (fuera del envase = dentro del envase) cuando es envasado a medio ambiente.

O<sub>2</sub> = Porcentaje de O<sub>2</sub> dentro del envase.

CO<sub>2</sub> = Porcentaje de CO<sub>2</sub> dentro del envase.

### Resolución de sistema de ecuaciones diferencias ordinarias de primer orden

El programa a elaborar resolverá el sistema de ecuaciones ordinarias, como variables dependientes se tiene al tiempo y variables independientes a porcentaje de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> durante el almacenamiento de frutas y hortalizas bajo atmosfera modificada bajo refrigeración.

Para cuantificar (O<sub>2</sub> = Y<sub>1</sub>) (%)

$$\frac{d(Y_1)}{dt} = \left( 100 \frac{P_{O_2}}{L} \frac{A}{V} P_T \left( 0,21 - \frac{(Y_1)}{100} \right) \right) - \frac{M}{V} * 100 \left[ \frac{vm_{O_2} * Y_1}{km_{O_2} + \left( 1 + \frac{Y_2}{ki} \right) * Y_1} \right]$$

Para Cuantificar (CO<sub>2</sub> = Y<sub>2</sub>) (%)

$$\frac{d(Y_2)}{dt} = \left( 100 \left( \frac{P_{CO_2}}{L} \right) \left( \frac{A}{V} \right) P_T \left( 0 - \frac{(Y_2)}{100} \right) \right) + \frac{M}{V} * 100 \left[ \frac{vm_{CO_2} * Y_2}{km_{CO_2} + \left( 1 + \frac{Y_1}{ki} \right) * Y_2} \right]$$

### Evaluación estadística

Los datos experimentales se compararon con los valores simulados, el error porcentual medio relativo (%E), la raíz media de los errores cuadrados (ecuación 3) y el parámetro Chi-cuadrado (ecuación 2).

Para O<sub>2</sub> es:

$$\%E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_{2 \text{ experimental}} - O_{2 \text{ predecido}}|}{O_{2 \text{ experimental}}} \quad (1)$$

Donde:

% E = Error porcentual medio relativo

N = Número de datos experimentales o repeticiones

O<sub>2</sub> exp = Contenido de oxígeno experimental (%)

O<sub>2</sub> pre = Contenido de oxígeno predecido (%)

GI = Grados de libertad del modelo (N-1)

Para CO<sub>2</sub> es:

$$\%E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|CO_{2 \text{ experimental}} - CO_{2 \text{ predecido}}|}{CO_{2 \text{ experimental}}} \quad (2)$$

$$\chi^2_{0,95,11} = \frac{\sum_{i=1}^N (O_{2 \text{ experimental}} - O_{2 \text{ predecido}})^2}{N} \quad (3)$$

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Programa Para Resolución de Sistema de EDOs en Visual Basic.

En el lenguaje de computación de Microsoft Visual Basic versión 6.0, se desarrolló el programa de cómputo que permitieron calcular los valores de cantidad de consumo de oxígeno (O<sub>2</sub>) y producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante el periodo de almacenamiento en atmósfera modificada. Para ello se estructuró primero el formulario como es mostrado en la Figura 3, para la cuantificación del porcentaje de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> dentro del espacio libre del empaque con la fruta se aplicaron los métodos numéricos de Resolución de Sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias, dentro de ello el método de Runge Kutta de cuarto orden, como podemos observar los resultados de la estructura en la parte de programa.

### a) Formulario

Ver Figura 3.

### b) Programa

```
Private Sub Command1_Click()
Dim x(1000), y(1000), Z(1000)
x(0) = Val(Text1)
y(0) = Val(Text2)
Z(0) = Val(Text3)
h = Val(Text4)
n = Val(Text5)
With List1
AddItem Space(2) & "n" & Space(10) &
"Tiempo(horas)" & Space(10) & "O2(%)" &
Space(15) & "CO2(%)"
End With
```



**Figura 3.** Formulario del programa para la aplicación de la respiración.

**CONSUMO DE O<sub>2</sub> Y PRODUCCION DE CO<sub>2</sub> EN POS-COSECHA DE FRUTAS BAJO ATMOSFERA MODIFICADA**

**Características del producto**

Peso (kg) = 0.47

Constantes de velocidad de respiración de Michaelis Menten

	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)
vm(mg/kg h)	53.1	36.1
km(%)	57.9	1.5
ki(%)	14.7	16

Tiempo (h) = 10  
Intervalo de tiempo (h) = 1  
Nº de valores de salida (n) = 45

**Características del empaque**

Perm al O<sub>2</sub>(mL O<sub>2</sub>/h cm atm) = 0.675  
Per al CO<sub>2</sub>(mL/h cm atm) = 4.555  
Area (pul<sup>2</sup>) = 53  
Volumen libre (mL) = 843

Condición inicial de la atmósfera dentro del empaque

O<sub>2</sub>(%) = 21  
CO<sub>2</sub>(%) = 0

**CALCULAR**

**SALIR**

Fuente: Elaboración propia.

```

For i = 0 To n - 1
funcion1 x(i), y(i), Z(i), k1
funcion2 x(i), y(i), Z(i), c1
funcion1 x(i) + 0.5 * h, y(i) + 0.5 * h * k1, Z(i) +
0.5 * h * c1, k2
funcion2 x(i) + 0.5 * h, y(i) + 0.5 * h * k1, Z(i) +
0.5 * h * c1, c2
funcion1 x(i) + 0.5 * h, y(i) + 0.5 * h * k2, Z(i) +
0.5 * h * c2, k3
funcion2 x(i) + 0.5 * h, y(i) + 0.5 * h * k2, Z(i) +
0.5 * h * c2, c3
funcion1 x(i) + h, y(i) + h * k3, Z(i) + h * c3, k4
funcion2 x(i) + h, y(i) + h * k3, Z(i) + h * c3, c4
x(i + 1) = x(i) + h
y(i + 1) = y(i) + (h / 6) * (k1 + 2 * k2 + 2 * k3 + k4)
Z(i + 1) = Z(i) + (h / 6) * (c1 + 2 * c2 + 2 * c3 +
c4)
List1.AddItem i & Space(15 - iAux) & x(i + 1) &
Space(30 - iAux) & Round(y(i + 1), (2)) & Space(20
- iAux) & Round(Z(i + 1), (2))
Next i
End Sub
Sub funcion1(x, y, Z, f1)
po2 = Val(Text6)
pco2 = Val(Text7)
A = Val(Text8)
V = Val(Text9)
M = Val(Text10)
vmo2 = Val(Text11)
kmo2 = Val(Text12)

```

```

ko = Val(Text13)
B1 = 100 * po2 * A / V
B2 = 100 * pco2 * A / V
C = M * 100 / V
f1 = B1 * (0.21 - 0.01 * y) - C * vmo2 * y / (kmo2 +
(1 + Z / ko) * y)
End Sub
Sub funcion2(x, y, Z, f2)
po2 = Val(Text6)
pco2 = Val(Text7)
A = Val(Text8)
V = Val(Text9)
M = Val(Text10)
vmo2 = Val(Text11)
kmo2 = Val(Text12)
ko = Val(Text13)
vmco2 = Val(Text14)
kmco2 = Val(Text15)
kico2 = Val(Text16)
B1 = 100 * po2 * A / V
B2 = 100 * pco2 * A / V
C = M * 100 / V
f2 = B2 * (0 - 0.01 * Z) + C * ((vmo2 * y / (kmo2 +
(1 + Z / ko) * y)) + (vmco2 * Z / (kmco2 + (1 + y /
kico2) * Z)))
End Sub
Private Sub Command2_Click()
Unload Me
End Sub

```

### Compilación del Programa

Este programa elaborado puede ser aplicado para cualquier fruta en general, basta en conocer tres factores como es el producto, dentro de ello la cantidad, su velocidad de respiración en función de las constantes de Michaelis-Menten; las propiedades del empaque, permeabilidades a los gases de la atmósfera dentro del espacio libre del empaque como  $O_2$  y  $CO_2$ , tamaño de la bolsa y volumen del espacio libre del empaque.

Las constantes de Michaelis-Menten usados para la compilación del programa son los valores obtenidos experimentalmente para plátano variedad 'Moquicho o Biscochito'.

### Validación del programa

La validación del programa se realizó haciendo la comparación de los valores simulados con los valores experimentales para el plátano variedad 'Moquicho o Biscochito' en su estadio de madurez fisiológica, como se puede observar en las Figuras 4 y 5, la tendencia del  $O_2$  y  $CO_2$  residual dentro del empaque conforme transcurre el tiempo de almacenamiento, podemos observar que a partir de las 25 horas de almacenamiento a 21 °C es constante, la diferencia del  $O_2$  que ingresa producto de la permeabilidad del empaque y del  $O_2$  que es consumido por el plátano. En cuanto al  $CO_2$  residual de igual manera la diferencia de lo que se produce y lo que se expulsa hacia afuera, este valor de  $CO_2$

residual sirve para inhibir la respiración, es por ello a partir de las 25 horas el oxígeno residual dentro del empaque se mantiene constante y de igual manera el  $CO_2$  es constante, esto quiere decir que la atmósfera está compuesto de la siguiente manera, 9 % de  $O_2$  y 3,8% de  $CO_2$ , valores que se encuentra dentro de las señaladas teóricamente.

En la figura 04 se grafica la composición del gas predicho en función del tiempo dentro del empaque conteniendo 0.225 kg de plátano variedad 'Moquicho o Biscochito'. Permeabilidad del empaque al  $O_2$  y  $CO_2$  de 0,875 y 4,505 mL/pulg<sup>2</sup> h atm, respectivamente. Área del empaque 60 pulg<sup>2</sup> y Volumen del espacio libre 843 mL.

En la Figura 5 se ilustra comparativamente, simulado y experimental, la composición del gas predicho en función del tiempo dentro del empaque conteniendo 0.225 kg de plátano variedad 'Moquicho o Biscochito'. Permeabilidad del empaque al  $O_2$  y  $CO_2$  de 0,875 y 4,505 mL/pulg<sup>2</sup> h atm, respectivamente. Área del empaque 60 pulg<sup>2</sup> y Volumen del espacio libre 843 mL.

Los datos de permeabilidad que se utilizaron para la simulación del programa de respiración fueron tomados de los reportados por Mannapperuma *et al.* (1989) y las constantes de Michaelis-Menten reportados de Song *et al.* (1992).

Varios materiales de empaque vienen siendo utilizados para acondicionar frutas y hortalizas.

**Tabla 1.** Permeabilidad al  $O_2$  y  $CO_2$  del empaque 5 °C obtenido por Lee y Yam (1996)

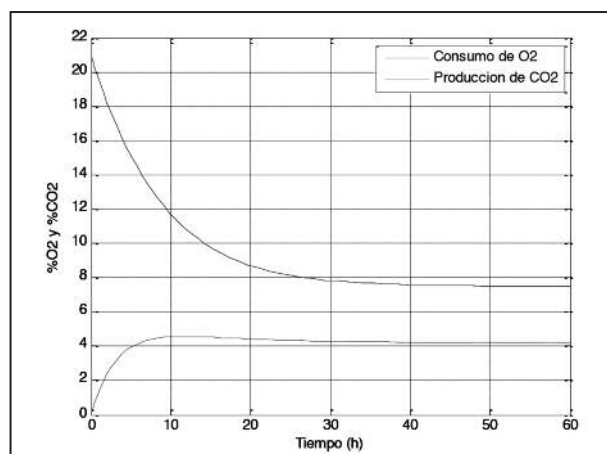
Film	$P_{O_2}$ mL/pulg <sup>2</sup> h atm	$P_{CO_2}$ mL/pulg <sup>2</sup> h atm
PEBD(50 µm)	0.875	4.505

Fuente: Elaboración propia.

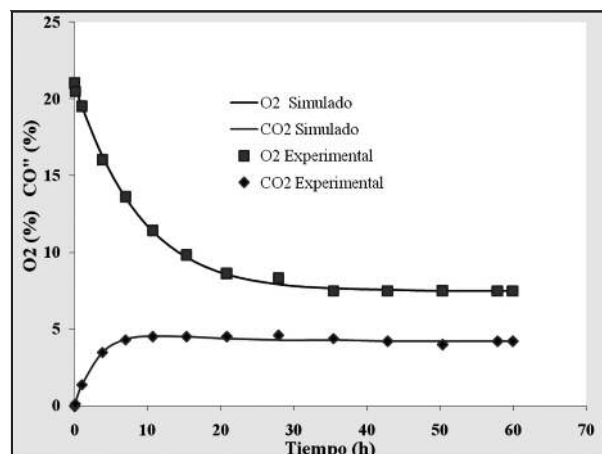
**Tabla 2.** Constantes de Michaelis – Menten para la respiración de para diferentes frutos a 5 °C obtenidos experimentalmente por LEE y YAM (1996), HEYDARI *et al.* (2010), MAHAJAN y GOSWAMI (2001)

	Respiración	$v_m$ (mL/kg h)	$K_m$ (%)	$K_i$ (%)
Plátano variedad 'Moquicho o Biscochito' 21°C	$O_2$	53.798	3.427	102.672
	$CO_2$	81.953	11.124	70.451

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.** Composición del consumo y producción de gas.

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.** Comparación de gases.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de ellas se incluyen polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad, polipropileno, poliestireno y policlorato de vinilo (PVC). Conociéndose las características respiratorias del producto, se puede seleccionar un film plástico con una tasa de permeabilidad tal que permita el ingreso de oxígeno a través del empaque, para compensar el consumo de este gas, y también la salida del exceso de gas carbónico, debido a la respiración del producto (Kader, Zagory y Kerbel, 1989).

En la Figura 04 se pueden observar los resultados del porcentaje de dióxido de carbono producido en función del tiempo de almacenamiento, en ella podemos observar que la producción de CO<sub>2</sub> se estabiliza a los 20 horas aproximadamente. La concentración de CO<sub>2</sub> aumenta con respecto al tiempo hasta llegar a una concentración de alrededor de 8%, 11% y 15 % de CO<sub>2</sub>, respectivamente. Esto significa que por cada mol de oxígeno consumido se produce un mol de CO<sub>2</sub>.

Según Mathooko (1996), una de las principales consecuencias de altos contenidos de CO<sub>2</sub> en productos hortícolas frescos es su efecto en la reducción de la tasa de respiración. Este efecto del CO<sub>2</sub> puede ser tanto de estimulador como de inhibidor de la respiración, dependiendo de su concentración, de la concentración de O<sub>2</sub>, del tiempo de exposición, del cultivar y de la temperatura durante y su posterior exposición del CO<sub>2</sub>. Se considera que la diferente sensibilidad de varios

productos puede estar relacionada a los niveles internos de CO<sub>2</sub> diferentes, los cuales ocurren debido a la tasa de respiración, características del depósito y volumen interno de gas o, también a causa de reacciones enzimáticas y las diferencias en la estructura anatómica.

Resultados de evaluación estadística de los valores simulados con los experimentales:

	Para O <sub>2</sub>	Para CO <sub>2</sub>
%E	0,81	0,28
X20.95,11	2,31 < 19,67	3,60 < 14.07

Para la validación del programa y los resultados obtenidos, se realizaron las comparaciones con los valores experimentales, obteniéndose un % E = 0,81 % para O<sub>2</sub> y 0,28% para CO<sub>2</sub>, de ello podemos afirmar que los resultados obtenidos por simulación se ajustan a los valores experimentales en las condiciones de estudio. Para corroborar los resultados también se procedió a realizar la prueba del Ji cuadrado a un nivel de significancia del 95% y 11 grados de libertad, los resultados son no significativos del valor simulado y experimental por lo cual se valida el programa y se afirma que las constantes de cinética de Michelis-Menten se adaptan también muy bien a la aplicación de respiración de frutas.



#### 4. CONCLUSIONES

1. Si es posible hacer uso de la ecuación de Michaelis-Menten en la simulación de la respiración de vegetales empacadas bajo atmosfera modificada.
2. Las Ecuaciones diferencias ordinarias facilitan la cuantificación de oxígeno residual y dióxido de carbono dentro del empaque de vegetales bajo atmosfera modificada.
3. La cantidad de oxígeno dentro del empaque se estabiliza a partir de las 20 horas de almacenamiento del plátano.
4. El dióxido de carbono es estable a partir de las 30 horas de almacenamiento del plátano.
5. El programa elaborado tuvo comportamiento satisfactorio para diferentes frutas como tomate, brócoli, manzana y plátano.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fonseca, S.C.; Oliveira, F.A.R., y Brecht, J.K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified Atmosphere package: a review. *Journal of Food Engineering*, 52, 99-119.
- [2] Hinojosa, A y Escalona, V. (2011). Modelización del ambiente en condiciones de atmósfera modificada. En A. Perez (Presidente). *Ponencia VI Reunión Científico-Técnica Futura*, Buenos Aires.
- [3] Mannapperuma, J.D., Zagory D., Singh R.P. y Kader A.A (Junio de 1989). Desing of polymeric packages for modified atmosphere storage of fresh produce,. En: J.K. Fellman (editor), *Proceeding of the Fifth International Controlled Atmosphere Research Conference*. 2, 225-233.
- [4] Kader, A. (2002). Postharvest technology of horticultural crops, third edition. University of California. En Kader (editor). *Agriculture and Natural Resources*, 3311, 535..
- [5] Mathooco, F.M. (1996). Regulation of respiratory metabolism in fruits and vegetables by carbon dioxide. En Taylor (Presidente). *Postharvest Biology and Technology*. 9,247-264.
- [6] Song, Y. Vorsa N. Yam K.L. (2002). Modeling respiration – transformation in a modified atmosphere packaging system containing blueberry. En Song (Presidente) *Journal of Food Eng.* 53,103-109.
- [7] Song, Y., H.K. Kim and K.L. Yam (1992). Respiration rate of blueberry in modified atmosphere at various temperatures. En Song (Presidente) *American Soc. Hort. Sci.*, 117, 925–929.