

Modelado dinámico del intercambio de gases en el envase de frutas y vegetales bajo atmósferas modificadas.

Resumen

Las frutas y los vegetales son parte importante de nuestra dieta. El manejo, almacenamiento y embarque adecuado de frutas y vegetales reducirá pérdidas, mantendrá la alta calidad del producto y dará a los productores una ventaja competitiva en los mercados domésticos y extranjeros.

La modificación del medio circundante al producto es un método utilizado para mantener su calidad. La

atmósfera modificada se crea empacando el producto fresco en bolsas de películas poliméricas o en contenedores diseñados apropiadamente para la difusión de gases. El proceso se basa en la respiración y difusión natural de O_2 y CO_2 a través del empaque para proveer del ambiente deseado.

En este estudio se utiliza un modelo matemático simple para ilustrar los principios involucrados en el diseño de atmósferas modificadas por empaques. Este modelo se usa para simular, por medio de computadora, el comportamiento dinámico de la atmósfera a través del empaque. El modelo matemático manejado toma en cuenta la respiración del fruto y la permeabilidad de la película.

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.

La reducción de oxígeno (O_2) y el enriquecimiento en dióxido de carbono (CO_2) son consecuencias naturales del desarrollo de la respiración cuando las frutas y hortalizas frescas se almacenan en un envase. Las modificaciones en la composición de la atmósfera provocan un descenso en la intensidad de la respiración del material vegetal (Day 1993).

Si el producto está encerrado en una película impermeable, los niveles de oxígeno en el interior del paquete podrían descender a concentraciones muy bajas en la que se podría iniciar la respiración anaerobia. La anaerobiosis, con acumulación de etanol, acetaldehído y ácidos orgánicos, normalmente se asocia con olores y sabores

desagradables y con una marcada degradación en la calidad del producto. Además, existe un riesgo de crecimiento de organismos patógenos anaerobios, como *Clostridium botulinum* (Bernard 1987).

A la inversa, si las frutas u hortalizas se encierran en una película con permeabilidad excesiva, se producirá poca o ninguna modificación de la atmósfera en el interior del envase.

Materiales y métodos

Imitación del empaque plástico

Para estudiar experimentalmente los cambios en la atmósfera modificada se llevaron a cabo simulaciones numéricas de la dinámica del intercambio de gases en dicha atmósfera. Una cámara en forma de domo de 1.6 L de plástico rígido fue usada para simular un empaque de atmósfera modificada. Se considera una película de polietileno de baja densidad de 0.4 mm de espesor.

Cálculos numéricos

Los cálculos numéricos se efectuaron en una PC Pentium II usando el programa de cálculo simbólico Mathematica® 3.0. Las unidades base utilizadas en el estudio son las del Sistema Internacional de Unidades, SI, excluyendo el tiempo. Para las representaciones gráficas, así como para las simulaciones numéricas, fue más conveniente expresar el tiempo en horas.

Modelo matemático.

La difusión de los gases involucrados en la respiración de frutas puede escribirse de la siguiente manera si se refiere a la figura 1 como una representación del empaque (Chau et al. 1994) y (Fishman et al. 1995 y 1996). La respiración involucra naturalmente humedad. La acumulación de una capa de agua dentro de la película debida a la condensación de la humedad se observa frecuentemente en el empaque de productos frescos, sin embargo se ha encontrado experimentalmente que la permeabilidad de ciertas películas poli-

méricas no ven afectados los fenómenos de difusión de los gases en presencia de humedad, como lo reporta Yasuda (1975).

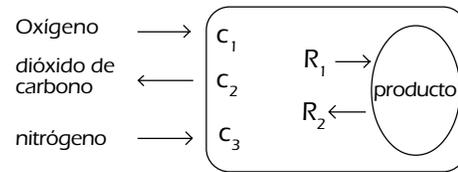


FIGURA 1. MODELO DEL EMPAQUE DE PRODUCTO.

La difusión de un gas a través de una película obedece a la ley de Fick de difusión molecular:

$$N_{AZ} = -CD_{AB} \frac{dx_A}{dz} \quad (1)$$

Que puede simplificarse apropiadamente de la siguiente manera para cada especie:

$$\text{oxígeno} \quad V \frac{dx_1}{dt} = \frac{P_1 A}{b} (c_1 - x_1) - WR_1 \quad (2)$$

$$\text{dióxido de carbono} \quad V \frac{dx_2}{dt} = \frac{P_2 A}{b} (c_2 - x_2) - WR_2 \quad (3)$$

$$\text{nitrógeno} \quad V \frac{dx_3}{dt} = \frac{P_3 A}{b} (c_3 - x_3) \quad (4)$$

Estas ecuaciones describen la velocidad de cambio de las concentraciones de los tres gases: oxígeno, dióxido de carbono y nitrógeno. Además, la relación del gas ideal tiene que obedecerse por los gases dentro del empaque. Esto da una restricción sobre la presión total del sistema:

$$P = (X_1 + X_2 + X_3) RT$$

Combinando las ecuaciones (2) y (3), considerando el caso cuando $WR_1 = WR_2$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{dx_1}{dt} + \left(\frac{P_2 A}{b}\right) x_2(0) - \left(\frac{P_2 A}{b}\right) x_2(t) + \left(\frac{P_1 A}{b}\right) x_1(0) - \left(\frac{P_1 A}{b}\right) x_1(t) \quad (6)$$

Este conjunto de ecuaciones no lineales (2,3,4,5 y 6), son ecuaciones acopladas, el cambio en el volumen im-

puesto por la ley del gas ideal hace que el sistema de ecuaciones no lineal requiera de métodos numéricos para hallar soluciones.

Resultados y discusión

Para poder llevar a cabo las simulaciones numéricas se necesitan conocer algunos parámetros característicos de las películas poliméricas, como son: el espesor, las dimensiones del empaque, las permeabilidades a los gases, el peso del producto, las concentraciones iniciales de los gases presentes en el empaque y la duración del proceso.

Los datos de permeabilidad que se utilizan en este estudio fueron tomados de los datos reportados por Greengrass (1993) y por Manapperuma y Singh (1994).

Efecto del flujo

En primer lugar se mencionan los resultados obtenidos de la simulación dinámica al variar el flujo, este comportamiento tiene que ser validado con experimentos para frutos, sin embargo podemos decir que se ha corroborado con otros datos reportados en la literatura la validez de los resultados.

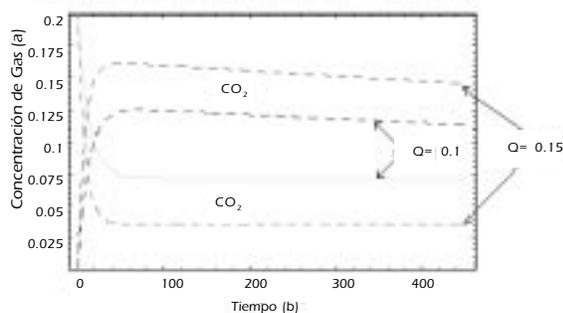


FIGURA 2. SIMULACIÓN DINÁMICA DE UNA ATMÓSFERA MODIFICADA POR UN EMPAQUE, ILUSTRANDO EL EFECTO DEL FLUJO.

Efecto del espesor de la película

El espesor de la película afecta el proceso de difusión de gases, el modelo matemático permite explorar el fenómeno de intercambio de gases al variar el espesor de la película.

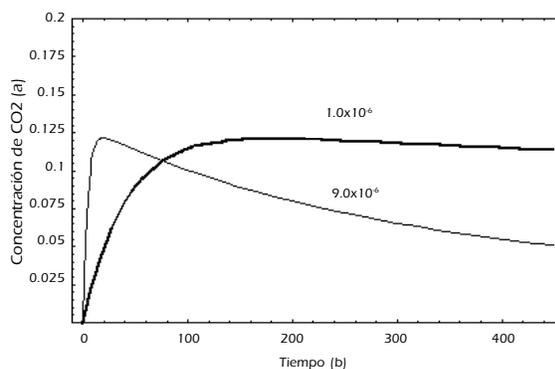


FIGURA 3. PREDICCIÓN DEL MODELO REPRESENTANDO LAS CONCENTRACIONES DEL CO_2 CON EL TIEMPO PARA DOS ESPESORES DE PÉLICULA, $B=(1.0 \times 10^{-6}$ Y $9.0 \times 10^{-6})$.

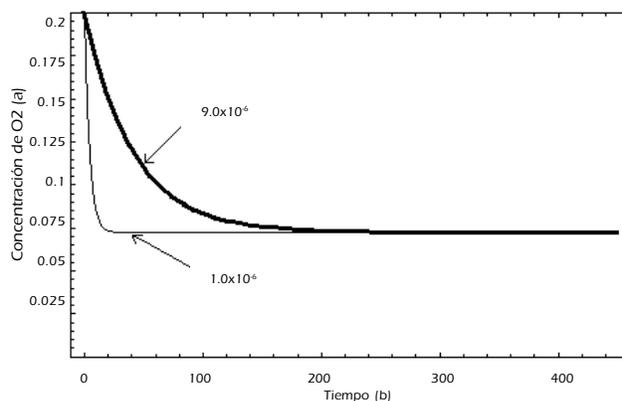


FIGURA 4. PREDICCIÓN DEL MODELO REPRESENTANDO LAS CONCENTRACIONES DEL O_2 CON EL TIEMPO PARA DOS ESPESORES DE PÉLICULA, $B=(1.0 \times 10^{-6}$ Y $9.0 \times 10^{-6})$.

Conclusiones

Se han mostrado, mediante un modelo matemático sencillo, las características presentes en un proceso de respiración de frutos bajo una atmósfera modificada por una película que sirve como empaque.

Puede apreciarse, de igual manera, el comportamiento climático reflejado por sistemas reales, esta característica es muy importante en frutos climatéricos y el caso de la papaya no es la excepción.

Este modelo muestra la influencia de algunos parámetros como el espesor de la película, el volumen y la permeabilidad en el diseño de empaques poliméricos para modificar atmósferas con producto fresco.

Se observa que el flujo de gases es importante para la consecución del intercambio de gases que se desee.

El intervalo de atmósferas modificadas que se obtienen por el uso de películas poliméricas está gobernado por la permeabilidad de las películas. Este parámetro cae en una región estrecha para un gran número de polímeros de acuerdo a lo reportado en la literatura.

Con la información extraída de este estudio podemos explorar experimentalmente el uso de películas poliméricas, para comenzar escogemos el polietileno de baja densidad para la conservación de papaya maradol. Esta película es fácil de conseguir, barata y, según el análisis expuesto, es una buena opción.

Posteriormente se tendrá que verificar, experimentalmente, si el efecto del agua sobre la respiración del fruto es inocuo, como se considera aquí, o se tendrá que incluir en el modelo el efecto del agua sobre el proceso global de difusión; se contempla también la posibilidad de sustituir el polietileno utilizado en la simulación por algún otro material, pudiendo ser este un biopolímero.

Nomenclatura

A es el área de la película (m^2)
 b es el espesor de la película (m)
 c son las concentraciones de gas en el ambiente (mol/m^3)
 G es la velocidad en el flujo de gas (m^3/s)
 P es la permeabilidad (m^2/s)
 P es la presión (Pa)
 Q es la velocidad en el flujo de gas (m^3/s)
 R es la velocidad de respiración ($mol/kg\cdot s$)
 R es la constante universal de los gases ($J/mol\cdot K$)
 T es la temperatura (K)
 W es el peso de producto en el empaque (kg)
 x es la concentración de gas en la atmósfera del empaque (mol/m^3)

Los subíndices 1, 2 y 3 denotan O_2 , CO_2 y N_2 respectivamente 

Bibliografía

- 1.- BERNARD, W. J.
1987 *Produce Packaging to Avoid Anaerobiosis and Prolong Quality Shelf-Life*, CAP '87, Schotland Business Research Inc., Princeton, New Jersey, USA, pp.255-263.
- 2.- CHAU, K.V., TALASILA, P. C.,
1994 *Design of Modified Atmosphere Packages for Fresh Fruits and Vegetables*, In: *Process Optimization and Minimal Processing of Foods*, R.P. Singh and Oliveira, F.A., (Ed), pp. 407-416.
- 3.- DAY, B.P.,
1993 *Frutas y hortalizas, en: Envasado de los Alimentos en Atmósfera Modificada*, R. T. Parry, (Ed), pp. 133-154.
- 4.- FISHMAN, S., RODOV, V., PERETZ, J., y BEN-YEHOSHUA, S.
1995 *Model for Gas Exchange Dynamics in Modified-Atmosphere Packages of Fruits and Vegetables*. J. Food Sci. 60: 1078-1083.
- 5.- FISHMAN, S., RODOV, V., y BEN-YEHOSHUA, S.
(1996 *Mathematical Model for Perforation Effect on Oxygen and Water Vapor Dynamics in Modified-Atmosphere Packages*, J. Food Sci. 61: 956-961.
- 6.- GREENGRASS, J.
1993 *Films para Envasado en Atmósfera Modificada*, En: *Envasado de los Alimentos en Atmósfera Modificada*, Parry, R.T., (Ed). pp. 79-118.
- 7.- MANNAPPERUMA, J., SINGH, R.P.
1994) *Modeling of Gas Exchange in Polymeric Packages of Fresh Fruits and Vegetables*, In: *Process Optimization and Minimal Processing of Foods*, R.P. Singh and Oliveira, F.A., (Eds), pp. 437-458.
- 8.- WOLFRAM, S.
1997 *Mathematica, A System for Doing Mathematics by Computer*.
- 9.- YASUDA, H.
1975 *Units of Gas Permeability Constants*. Journal of Applied Polymer Science, 19: 2529.

Enrique Lemus Fuentes
 Juana Ramirez Andrade
 Universidad Tecnológica de la Mixteca