

RECUBRIMIENTO COMESTIBLE BASADO EN GOMA ARÁBIGA Y CARBOXIMETILCELULOSA PARA CONSERVAR FRUTAS EN ATMÓSFERA MODIFICADA

S. Valle-Guadarrama[¶]; O. López-Rivera;
M. Reyes-Vigil; J. Castillo-Merino;
A. Santos-Moreno

Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo.
Carretera México-Texcoco, Km. 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. MÉXICO.
Correo-e: svalle@correo.chapingo.mx ([¶]Autor responsable).

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue desarrollar un recubrimiento comestible a base de goma arábiga (GA), carboximetilcelulosa (CMC) y glicerol (GL) como plastificante, para valorar su potencial de uso en sistemas de conservación de frutos en atmósfera modificada, mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas, de barrera a gases y de transmisión de luz. En una fase de diseño evolutivo se obtuvo una formulación aproximada del recubrimiento; con esta base se definieron rangos de concentraciones de GA (20 y 30 %), CMC (0.25, 0.50 y 0.75 %) y GL (5, 10 y 15 %) para caracterizar el material. La combinación de GA en proporción de 30 %, CMC en un rango de 0.25 a 0.50 % y GL en un rango de 5 a 10 %, presentó un potencial adecuado para uso en conservación de frutos mediante sistemas de atmósfera modificada. El cambio de las concentraciones en GA, CMC y GL permitió regular las permeabilidades a O₂ y CO₂ y la resistencia mecánica, con una transparencia mayor a 80 %.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: permeabilidad, módulo de elasticidad, transmisión de luz.

EDIBLE FILMBASED ON ARABIC GUM AND CARBOXIMETHYL CELLULOSE TO PRESERVE FRUITS IN MODIFIED ATMOSPHERE

ABSTRACT

The aim of this work was to develop an edible film based on arabic gum (AG), carboxymethylcellulose (CMC) and glycerol (GL) as plasticizer and assess its potential for covering fruits to preserve them in a modified atmosphere. We evaluated its mechanical properties in terms of impermeability and light transmission. In an evolutionary design phase an approximate formulation of the film was obtained. With this basis, a range of concentrations for AG (20 and 30 %), CMC (0.25, 0.50 and 0.75 %) and GL (5, 10 and 15 %) were defined to characterize the material. The combination of 30 % AG, 0.25 to 0.50 % CMC and 5 to 10 % GL was adequate for use in fruit preservation in modified atmosphere systems. By changing concentration of AG, CMC and GL O₂ and CO₂ permeabilities and mechanical resistance could be regulated. Transparency was more than 80 %.

ADDITIONAL KEY WORDS: CO₂ permeability, elasticity modulus, light transmission.

INTRODUCCIÓN

Las atmósferas modificadas representan una opción para incrementar la vida útil de los productos hortofrutícolas. En su desarrollo se usan cubiertas de material plástico como polietileno, polipropileno, entre otros, que por sus propiedades inherentes de permeabilidad selectiva a gases, propician una reducción en la disponibilidad de O₂ y un

aumento de CO₂ en el ambiente circundante del producto, lo que induce una reducción de la actividad metabólica de este último (Kader, 2002).

Como alternativa a las películas plásticas se pueden usar recubrimientos basados en carbohidratos, proteínas y lípidos, que por su composición permiten que sean comestibles. Estos materiales se aplican directamente a la

superficie de los productos y llegan a formar parte de ellos (Bosquez *et al.*, 2000; Debeaufort *et al.*, 2000). En semejanza a los plásticos, desarrollan propiedades de permeación selectiva a gases (Amarante y Banks, 2001) y por esto pueden potencialmente sustituirlos. Por otro lado, existe la necesidad de reducir el empleo de materiales no biodegradables para el envase, porque constituyen un porcentaje importante en la acumulación de desechos sólidos (Risch, 2000), lo que ha generado una tendencia importante para desarrollar sistemas de atmósfera modificada basados en estos recubrimientos comestibles.

Los recubrimientos comestibles se pueden aplicar en frutos intactos (Díaz-Sobac *et al.*, 1996; Del-Valle *et al.*, 2005) y en productos mínimamente procesados (Emmambux y Minaar, 2003). En cualquier caso, la selección de los componentes de una formulación puede obedecer a distintas motivaciones: si se busca reducir la pérdida de humedad del producto se recomienda usar un lipocoloide o, si se desea controlar el flujo de gases como O_2 o CO_2 es frecuente el uso de hidrocoloides (Debeaufort *et al.*, 2000). A menudo se requiere un doble propósito, por lo que es deseable un equilibrio de ambos tipos de materiales, lo que sugiere la selección de compuestos que favorezcan el control de un balance hidrofílico-lipofílico (BHL).

La goma arábica (GA) es un emulsificante efectivo que tiene las características de baja viscosidad, buena actividad de superficie y habilidad para formar una película protectora en una emulsión; ésta produce películas con las propiedades de un hidrocoloide y puede formar emulsiones estables con la mayoría de aceites (Chanamai y McClements, 2001), lo que favorece el control del BHL. La carboximetilcelulosa (CMC) es un polímero que forma película al solidificar, actúa como ligante, espesante y estabilizante (Girard *et al.*, 2002); además, produce materiales transparentes, lo que es una cualidad importante en los recubrimientos, pues permite mantener la apariencia de los productos. La CMC se ha usado como parte de películas comestibles para retrasar con éxito el proceso de maduración y senescencia de frutos de mango (Díaz-Sobac *et al.*, 1996), sin embargo, no se tienen informes con el uso de la goma arábica. Por tanto, el objetivo del trabajo fue desarrollar un recubrimiento comestible a base de goma arábica (GA) y carboximetilcelulosa (CMC), para valorar su potencial de uso en sistemas de atmósfera modificada, mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas, de barrera a gases y de transmisión de luz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material experimental

Se seleccionó como polímeros a la GA y a la CMC, por sus propiedades emulsificantes y por sus propiedades de baja opacidad, respectivamente. Como plastificante se seleccionó al glicerol (GL).

Descripción experimental general

El estudio se realizó en dos etapas. La primera correspondió al diseño evolutivo en el que se llevó a cabo la exploración para desarrollar la película y observar su apariencia con distintas concentraciones de GA, CMC y GL, bajo las diferentes condiciones de tiempo y temperatura de disolución.

La segunda etapa fue de caracterización. Se diseñó un experimento con 18 películas obtenidas de la combinación de dos niveles de GA (20 y 30 %), tres niveles de CMC (0.25, 0.50 y 0.75 %) y tres niveles de GL (5, 10 y 15 %), para evaluar la capacidad de intercambio de O_2 y CO_2 , el módulo de elasticidad y la capacidad de transmisión de luz. Para evitar el envejecimiento de las muestras, se formaron tres grupos que incluyeron cada una de las 18 formulaciones. El grupo dos se preparó cuando finalizó la evaluación del grupo uno y el grupo tres se preparó al finalizar la evaluación del grupo dos. Cada mezcla se preparó con agua destilada, calentando hasta 90 °C y agitando sin calefacción adicional durante 30 min posteriores. Las dispersiones se dejaron enfriar hasta temperatura ambiental y de cada una se tomaron 10 ml que fueron vaciados en la tapa de una caja petri. Todas las unidades se dejaron en reposo por 24 h sobre una base nivelada. Esta etapa se desarrolló como un arreglo factorial $2 \times 3 \times 3$, bajo un diseño completamente al azar, donde cada componente representó un factor. Con los datos obtenidos se realizó el análisis de varianza y las pruebas de comparación de medias (Tukey ≤ 0.05) mediante el programa SAS® (SAS Institute, Inc., 1989).

Variables respuesta

Transmisión de luz. Se prepararon probetas rectangulares de 0.5 x 4.0 cm que se colocaron en celdas de un equipo Spectronic Milton Roy modelo Genesys 5 (USA) en forma perpendicular al paso de luz. En cada probeta fue evaluada la transmitancia (en porcentaje) en una longitud de onda de 540 nm. Como blanco o testigo se utilizó una celda vacía.

Permeabilidad a O_2 y CO_2 . Cada película se colocó entre dos cajas de petri, para formar una celda con dos cámaras separadas por el material, donde la hermeticidad se creó con la aplicación de silicón térmico. Las cámaras contaban con un puerto de monitoreo y puertos de entrada y salida para permitir un flujo gaseoso. En la cámara superior, llamada depósito destino (D_d), se aplicó un flujo de 100 $ml \cdot min^{-1}$ de N_2 por 30 min. En la cámara inferior, llamada depósito fuente (D_f), se aplicó un tratamiento semejante, pero con aire normal. A un tiempo cero ($t = 0$) se inyectó 1 ml de CO_2 de alta pureza (99.8 %) en D_f y se inició el registro de la concentración de O_2 y CO_2 en D_d , a intervalos aproximados de 15 min, hasta completar cinco lecturas. Los resultados se ajustaron mediante regresión a la Ecuación (1) (Banks y Nicholson, 2000), donde k_1 se definió por la Ecuación (2) y k_2 (igual a $y_j^f - y_j^{d,0}$) fue la línea asintótica a

la curva formada por la Ecuación (1) (Valle-Guadarrama *et al.*, 2002):

$$y_j^{d,t} = y_j^{d,0} + k_2 \left(1 - e^{-k_1 t} \right) \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{R(T + 273.15)P_j' A^d}{V^d} \quad (2)$$

donde R es la constante del gas ideal ($8.314 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); T es temperatura ($^{\circ}\text{C}$); V^d es el volumen interno (m^3) de D_d ; A^d es el área (m^2) de la membrana que divide ambos depósitos;

$y_j^{d,t}$ es la concentración (en porcentaje) de O_2 o CO_2 en D_d al tiempo t (s); $y_j^{d,0}$ es la concentración (porcentaje) de O_2 o CO_2 en el mismo depósito al tiempo cero ($t=0$); y_j^f es la concentración (en porcentaje) de O_2 o CO_2 en D_i y P_j' es la permeancia ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$; Banks *et al.*, 1995) de la película de prueba a O_2 o CO_2 , cuyo valor se obtuvo de la Ecuación (2). Adicionalmente, se midió el espesor y se calculó la permeabilidad del recubrimiento (P_j en $\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$), multiplicando la permeancia por dicho espesor de membrana (Banks *et al.*, 1995).

Las concentraciones de O_2 y CO_2 fueron determinadas con un cromatógrafo de gases (Varian modelo 3400CX, USA) con columna capilar Chrompack® tipo poraplot Q, con detector por conductividad térmica (TCD) y detector por ionización de flama (FID). Se usaron temperaturas de 80, 150 y 170°C en la columna, inyector y detectores, respectivamente. La columna operó a presión manométrica de 158.5 kPa. La cuantificación del O_2 se auxilió con estándares de calibración (Praxair de México S.A. de C.V.) en balances de (2.01 % O_2 - 97.99 % N_2) y (4.98 % O_2 - 4.98 % CO_2 - 90.04 % N_2). Para el CO_2 se construyó una curva tipo, con recipientes de 7 ml de capacidad y la combinación de aire con CO_2 (99.8 %), para hacer mezclas de 0.03, 2.79, 5.54, 8.29, 10.48, 12.18 y 14.75 %. En todos los casos se realizó la inyección de muestras al cromatógrafo con jeringas de vidrio para gases (Hamilton®) en alícuotas de 100 ml.

Resistencia a la tensión. Se formaron probetas con 6.0 cm de alto y 3.0 cm de ancho, con una perforación al centro de 0.6 cm de diámetro para inducir un punto de ruptura. El área de la sección transversal en la región central varió entre 5.76×10^{-6} y $1.06 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, la cual fue obtenida con el producto del ancho (2.4 cm) y el espesor ($262 \pm 8 \text{ }\mu\text{m}$). Las probetas fueron sujetadas de los extremos y se dejó una longitud libre entre mordazas de 4.0 cm. Se aplicó un esfuerzo de tensión con un equipo analizador de textura (TA-X2i, Stable Micro Systems, UK) con velocidad de ensayo de $0.001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, hasta completar un recorrido de 0.030 m, que podía o no producir ruptura del material. Como los materiales no mostraron una línea recta al inicio de la curva esfuerzo-

deformación, el módulo de elasticidad se aproximó por medio de un módulo secante (Mangonon, 1999), midiendo el esfuerzo para una deformación unitaria de 5 %, y el producto de tal esfuerzo por esta deformación se tomó como módulo secante de elasticidad (Pa).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapas de diseño evolutivo

La preparación de películas con GA al 30 % y secado por 12 h resultó en un material liso, quebradizo, sin flexibilidad, de apariencia opaca y con puntos blanquecinos. Un segundo conjunto de ensayos, basado en tres niveles de GA (10, 20 y 30 %) y dos de temperatura (60 y 90°C) mostró que había solidificación a partir de 20 %, aunque con mayor concentración de GA resultaba difícil manipular la mezcla y se incorporaba aire que no se eliminaba durante el reposo. También, se determinó que los tiempos requeridos para obtener una disolución adecuada a 60 y 90°C fueron de 60 y 30 min, respectivamente, sin embargo, se encontró que si la condición de 90°C se aplicaba en forma sostenida podía causar caramelización. En todos los casos se obtuvieron materiales opacos y de consistencia quebradiza. La opacidad no fue una característica deseable por la eventual alteración de la apariencia del producto hortofrutícola a recubrir; además, una consistencia quebradiza no permite la estabilidad del polímero sobre el producto.

En forma paralela se realizaron ensayos con CMC, que formaron materiales completamente translúcidos. Con el fin de conservar el potencial emulsificante de la GA y obtener las características de transparencia de la CMC, fueron realizadas mezclas de ambos compuestos. Al preparar una disolución con 30 % GA y 0.5 % CMC, calentamiento a 90°C y mezclado posterior por 30 min, se obtuvo un material translúcido con un ligero tono amarillo, sin puntos blanquecinos, liso, brillante y de consistencia quebradiza. Finalmente, la consistencia fue mejorada con la elección del glicerol como plastificante, por lo que con 30 % GA, 0.5 % CMC, 15 % GL, calentamiento a 90°C , mezclado posterior por 30 min, vaciado y reposado por 24 h, se obtuvo un material translúcido y flexible. De acuerdo con Sothornvit y Krochta (2000), la adición de glicerol a una formulación reduce la fuerza intermolecular a lo largo de la cadena del polímero y esto resulta en un incremento de la flexibilidad.

Etapas de caracterización de la película

Transmisión de luz. Las películas presentaron transmisión de luz promedio de 81 %, lo que denota un grado alto de transparencia, pero no hubo diferencia significativa entre formulaciones (Cuadro 1). En la etapa de diseño evolutivo se encontró que la adición de CMC causó que el recubrimiento dejara de ser opaco y adquiriera una apariencia transparente y los datos del Cuadro 1 sugieren que basta agregar 0.25 % de CMC en la formulación para

conseguir esta característica. Actualmente no existen informes cuantitativos sobre el grado de transparencia de otros materiales, lo que impide hacer una comparación, sin embargo, los valores obtenidos en este trabajo sugieren que la aplicación de recubrimientos de GA-CMC-GL puede hacerse sin alterar las características visuales de los productos hortofrutícolas.

Módulo secante de elasticidad. Los resultados mostraron que al incrementar la concentración de GA se requería mayor esfuerzo para deformar las películas y por tanto se hacían más rígidas y menos extensibles (Cuadro 1). Sin embargo, los factores de CMC y GL produjeron un efecto contrario, obteniendo películas más extensibles con el aumento de concentración de estos compuestos. Los valores encontrados fueron del mismo orden de magnitud que los reportados por Chick y Ustunol (1998) para distintas películas elaboradas a base de proteínas. Estos autores determinaron valores ligeramente mayores con películas de caseína, aunque la diferencia pudo obedecer al uso de una velocidad de desplazamiento de la sonda de $50.8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ en el estiramiento, que fue mayor a la usada en el presente trabajo.

Cuando un producto se envasa se busca un control sobre el intercambio de gases con el medio circundante y protección en contra del estrés mecánico durante el transporte, el empaque y el almacenamiento (Debeaufort *et al.*, 2000). El fenómeno de fricción o rozamiento entre frutos o contra las paredes del recipiente, por efectos de vibración durante el empaque o transporte, es un factor que acelera el deterioro de un fruto. Zamora-Magdaleno *et al.* (1999) evaluaron que el problema de rozamiento en frutos de aguacate puede ocurrir de manera natural, aún antes de la cosecha y que está en función del tipo de manejo, por lo que el paso del producto por la empacadora puede originar que entre 7 y 62 % del mismo no pueda ser comercializado, ya que los frutos con síntomas mayores de rozamiento a la salida del proceso muestran velocidades más altas de ablandamiento, por lo que sugirieron la necesidad de aplicar tratamientos para retrasar dicha pérdida de firmeza y proveer protección en contra del estrés mecánico adicional. De hecho, al inducir una atmósfera modificada a nivel de tejido con el uso de una cubierta, se consigue un retraso en la pérdida de firmeza del producto, como lo demostraron Del-Valle *et al.* (2005) con la aplicación de un recubrimiento basado en mucílago de nopal sobre frutos de fresa, lo que se traduce en capacidad mayor para mantener la integridad ante impactos y rozamientos. En el mismo sentido, la aplicación de un recubrimiento ayuda en una situación de fricción, a que ésta no actúe sobre el pericarpio del fruto y disminuye el daño. Amarante *et al.* (2001), lograron dentro de una unidad de empaque la disminución del problema de decoloración causado por la fricción entre frutos de pera con el uso de un recubrimiento preparado con cera de carnauba.

Para cumplir con un objetivo de protección mecánica, el recubrimiento debe tener cierta capacidad de deformación,

en forma tal que ante la exposición a un esfuerzo, las capas más externas se deformen y dejen intactas aquellas más internas que contactan con la epidermis del producto, en forma semejante al fenómeno de flujo de fluidos en una conducción (Bird *et al.*, 1960). El análisis estadístico reportó que la resistencia mecánica del recubrimiento depende de una interacción significativa entre los componentes de la fórmula (Cuadro 1). La evaluación de esta interacción confirmó que la mayor resistencia se obtiene con mayor contenido de GA, pero puede modularse en un rango amplio con la adición de CMC y GL en los rangos de 0.25 a 0.5 % y de 5 a 10 %, respectivamente (Figuras 1A, 1B y 1C). Este hecho indica que resulta conveniente la selección de una concentración alta de GA y en función de las necesidades del producto se debe seleccionar el nivel adecuado de CMC y GL, para obtener una resistencia adecuada del recubrimiento. No obstante, se deben considerar otros aspectos, que en forma combinada orienten a mejorar la selección.

Permeabilidad a O_2 y CO_2 . El Cuadro 1 muestra los valores de permeabilidad a O_2 (\bar{P}_{O_2}) y CO_2 (\bar{P}_{CO_2}) obtenidos. No se encontró diferencia significativa entre los niveles de los factores evaluados; sin embargo, se encontró una interacción significativa entre éstos, lo cual indicó que el efecto causado por alguno de los componentes (GA, CMC o GL) depende de la presencia de los otros.

Para \bar{P}_{O_2} , el efecto del cambio de concentración de CMC con GA a 20 % fue distinto al causado con GA a 30 % (Figura 1). Con GA a 20 % se produjo un aumento no significativo al aumentar la CMC de 0.25 a 0.50 %, pero al variar de 0.50 a 0.75 % la permeabilidad a O_2 se redujo significativamente. En contraste, con GA a 30 %, no varió al cambiar la CMC de 0.25 a 0.50 % y el valor exhibido fue menor ($P \leq 0.05$) que con GA a 20 %. Sin embargo, el paso de 0.50 a 0.75 % generó un incremento en la capacidad de intercambio de O_2 , al grado que a la condición con 30 % de GA el recubrimiento se hizo más permeable que con 20 % de la goma (Figura 1D). La interacción entre la GA y el GL causó una situación inversa (Figura 1E). Con GA a 20 %, el incremento de GL causó un aumento en la permeabilidad a O_2 y con GA a 30 % se tuvo el efecto contrario. En este caso, con GL a concentración baja el recubrimiento fue más permeable cuanto mayor era la concentración de GA; sin embargo, con concentraciones altas de GL la mayor permeabilidad se obtuvo con menor GA. Por otro lado, la evaluación de la interacción entre GL y CMC (Figura 1F) mostró que con baja concentración de GL (5 %) el comportamiento fue semejante al caso de GA a 30 % cuando se incrementó la cantidad de CMC, pero con mayores concentraciones de GL, el aumento de CMC causó un comportamiento del tipo mostrado para GA a 20 % (Figura 1D).

En el caso de \bar{P}_{CO_2} , el resultado de las interacciones fue un comportamiento inverso al descrito para la permeabilidad a O_2 . Con GA a 20 % el aumento en CMC

CUADRO 1. Permeabilidad a O_2 (\bar{P}_{O_2} en $\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$), permeabilidad a CO_2 (\bar{P}_{CO_2} en $\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$), módulo secante de elasticidad (E_s) y capacidad de transmisión de luz (T) de películas elaboradas a base de goma arábica (GA), carboximetilcelulosa (CMC) y glicerol (GL), por efecto de compuesto químico.

Factor Nivel	\bar{P}_{O_2} ($\times 10^{-14}$)	\bar{P}_{CO_2} ($\times 10^{-14}$)	E_s (MPa)	T (%)
Goma arábica (GA)				
20 %	23.99 a ^z	7.34 a	0.93 b	80.21 a
30 %	16.31 a	7.78 a	1.96 a	81.80 a
DSH	10.56	4.80	0.78	2.04
Carboximetilcelulosa (CMC)				
0.25 %	17.30 a	13.80 a	2.23 a	80.32 a
0.50 %	25.14 a	1.01 b	1.15 ab	82.32 a
0.75 %	18.00 a	7.88 ab	0.95 b	80.37 a
DSH	14.88	7.64	1.25	3.22
Glicerol (GL)				
5 %	15.14 a	9.48 a	3.77 a	81.86 a
10 %	18.34 a	4.34 a	0.33 b	80.02 a
15 %	26.96 a	8.86 a	0.23 b	81.13 a
DSH	15.05	6.88	1.45	3.09
Interacciones				
GA x CMC	*	*	*	NS
GA x GL	*	*	*	NS
CMC x GL	*	*	*	NS

^zMedias con la misma letra entre niveles al interior de cada factor, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

NS, *: no significativo y significativo a una $P \leq 0.05$, respectivamente.

DSH: Diferencia significativa honesta.

causó una reducción de la capacidad de intercambio de CO_2 , pero con GA a 30 % se indujo un incremento (Figura 1G). Con GA a 20 % el aumento en GL causó una reducción de la permeabilidad a CO_2 , pero con GA a 30 % el resultado fue también un incremento (Figura 1H). Finalmente, en la interacción GL-CMC, se encontró que con baja concentración de GL (5 %) el aumento de CMC causó la reducción de \bar{P}_{CO_2} , pero cuando GL se fijó con 10 y 15 %, el aumento de CMC causó el incremento de dicha permeabilidad o se mantuvo constante, respectivamente (Figura 1I).

El proceso de permeación consiste en un fenómeno combinado de la solución del gas en el polímero y el transporte a través del mismo por difusión (Kester y Fennema, 1986). La presencia de interacciones indica que al cambiar la proporción de los componentes de las formulaciones se alteraron estos mecanismos, pero una explicación más detallada requerirá que en trabajos posteriores se explore el cambio estructural del polímero formado.

En promedio, los materiales resultaron más permeables a O_2 ($20.15 \times 10^{-14} \pm 3.87 \times 10^{-14} \text{ mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$) que a CO_2 ($7.56 \times 10^{-14} \pm 1.83 \times 10^{-14} \text{ mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$). Asimismo, la comparación con otros materiales, permite calificar de alta permeabilidad al O_2 y al CO_2 a los recubrimientos de GA-CMC-GL, pues Arvanitoyan

et al. (1998) reportaron valores menores de permeabilidad ($\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$) en películas de quitosano-gelatina-sorbitol (O_2 : 2.593×10^{-16} ; CO_2 : 1.12×10^{-15} ; $\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$), (almidón-hidroxiprolil)-gelatina-glicerol (O_2 : 4.8×10^{-15} ; CO_2 : 2.24×10^{-14}), (almidón-hidroxiprolil)-gelatina-sorbitol (O_2 : 1.28×10^{-14} ; CO_2 : 7.04×10^{-14}) y (almidón-hidroxiprolil)-gelatina-sacarosa (O_2 : 4.48×10^{-15} ; CO_2 : 1.60×10^{-14}). Jangchud y Chinnan (1999) reportaron que las películas de concentrado de cacahuate exhiben permeabilidad a O_2 de $3.68 \times 10^{-18} \text{ mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$, mientras que McHugh y Krochta (1994), encontraron que la transmisión de este gas en materiales de proteína aislada de suero de leche y glicerol ocurre entre 6.85×10^{-18} y $2.81 \times 10^{-18} \text{ mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$, que también es menor a la encontrada en el presente trabajo. La comparación con materiales plásticos confirma la capacidad de permeación mayor de las películas GA-CMC-GL, pues Cameron et al. (1995) señalaron que los valores, en $\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$, para polietileno de baja densidad son de 2.7×10^{-15} para O_2 y de 9.9×10^{-15} para CO_2 ; en el caso del polipropileno reportaron 9.0×10^{-16} para O_2 y 5.8×10^{-15} para CO_2 y en cloruro de polivinilo 1.9×10^{-17} para O_2 y 6.5×10^{-17} para CO_2 .

Valle-Guadarrama et al. (2005), reportaron que la permeancia a O_2 mínima que debe exhibir un recubrimiento

para conservar frutos preclimatéricos de aguacate 'Hass' fue $1.963 \times 10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$. Si la permeabilidad se divide por el espesor de la membrana se obtiene la permeancia (Banks *et al.*, 1995). Los materiales de GA-CMC-GL del presente trabajo tuvieron valores promedio de espesor y permeancia iguales a $262 \mu\text{m}$ y $7.69 \times 10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$, respectivamente. Esto indica que tales materiales se podrían usar como recubrimientos de los frutos de aguacate 'Hass' en la forma señalada. También es aplicable a lechuga, ya que Cameron *et al.* (1995) sugirieron que este producto se podría manejar en atmósfera modificada si se usa una película de polietileno con permeancia de $1.08 \times 10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$.

Selección del recubrimiento

Cuando se aplica un recubrimiento sobre un producto se reduce la capacidad de intercambio de gases del mismo con su entorno inmediato. Como el ingreso de O_2 requerido para la respiración y el egreso del CO_2 generado en ésta ocurren a menor velocidad, se causa una reducción de la concentración de O_2 y un incremento en la de CO_2 al interior del propio producto. Al cabo de cierto tiempo, las tasas de consumo de O_2 y producción de CO_2 se igualan con las de intercambio a través del conjunto cáscara-recubrimiento y se alcanzan concentraciones constantes, a lo que se llama un estado de régimen estacionario (Cameron *et al.*, 1995). Es fundamental evitar que en esta fase el O_2 y el CO_2 se instalen en un nivel inferior o superior, respectivamente, a los límites de tolerancia del producto, por lo cual al seleccionar un recubrimiento se debe dar prioridad a este criterio y esto implica definir los valores adecuados de permeabilidad a O_2 y CO_2 del mismo.

Los resultados del presente trabajo muestran que es factible controlar la permeabilidad a gases del recubrimiento de GA-CMC-GL, a través de las concentraciones de estos componentes. Si se consideran las variables de transmisión de luz y resistencia mecánica, resulta conveniente elegir una formulación basada en 30 % de GA y modular la permeabilidad a O_2 y CO_2 mediante la fijación de las concentraciones de CMC y GL en los rangos de 0.25 a 0.5 y 5 a 10 %, respectivamente, con base en el comportamiento mostrado por la Figura 1.

Debe, adicionalmente, considerarse que el material formulado presenta características de un hidrocoloide. De hecho, se observó que la presencia de humedad relativa alta inducía tiempos de solidificación mayores y apariencia pegajosa al tacto en materiales ya formados, lo que se atribuye a las propiedades higroscópicas de la CMC y del GL. Se sugiere, por tanto, explorar en trabajos posteriores el manejo del balance hidrofílico-lipofílico (BHL), aunque esto podría afectar la capacidad de intercambio gaseoso de la película, como lo mostraron Ayranci y Tunc (2001), que evaluaron el efecto de la incorporación de ácidos grasos para controlar el BHL en un material de metilcelulosa y

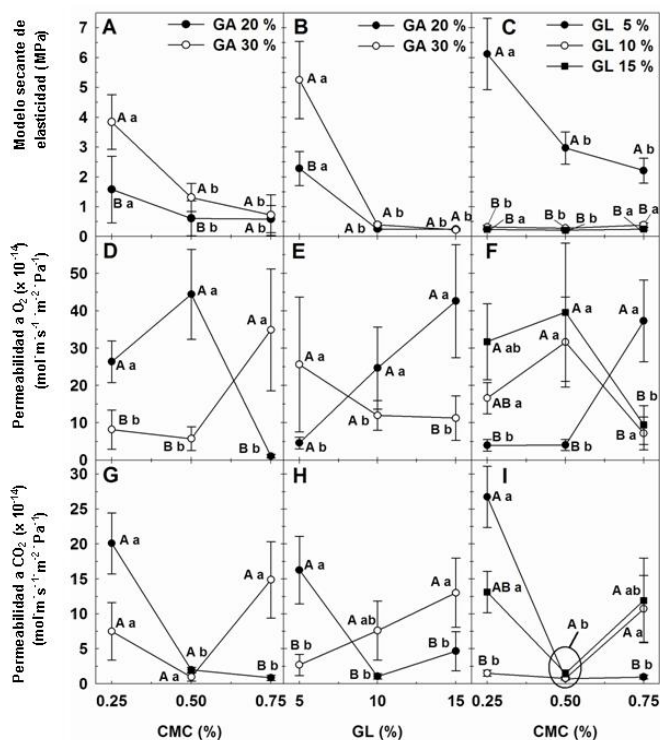


FIGURA 1. Efectos de la interacción entre componentes de las formulaciones usadas en la preparación de los recubrimientos. Los recuadros A, D y G explican la interacción GAxCMC, B, E y H la interacción GAxGL y C, F e I la interacción GLxCMC. Letras mayúsculas iguales indican diferencia no significativa entre líneas para la condición correspondiente en el eje de abscisas. Letras minúsculas iguales indican diferencia no significativa al interior de cada línea (Tukey, 0.05). Las barras representan error estándar (n=3).

observaron que la capacidad de intercambio gaseoso disminuía.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una película comestible basada en goma arábiga (GA), carboximetilcelulosa (CMC) y glicerol (GL). La combinación de GA en proporción de 30 %, CMC en un rango de 0.25 a 0.50 % y GL en un rango de 5 a 10 %, presentó un potencial adecuado para uso en conservación de frutos mediante sistemas de atmósfera modificada. El cambio de las concentraciones en GA, CMC y GL permite regular las permeabilidades a O_2 y CO_2 , modificar sus propiedades mecánicas y obtener capacidad de transmisión de luz mayor a 80 %.

LITERATURA CITADA

- AMARANTE, C.; BANKS, N. H. 2001. Postharvest physiology and quality of coated fruits and vegetables. *Horticultural Reviews* 26: 161-237.
- AMARANTE, C.; BANKS, N. H.; GANESH, S. 2001. Effects of coating concentration, ripening stage, water status and fruit tempe-

- perature on pear susceptibility to friction discolouration. *Postharvest Biology and Technology* 21(3): 283-290.
- ARVANITOYANNIS, I. S.; NAKAYAMA, A.; AIBA, S. I. 1998. Chitosan and gelatin based edible films: state diagrams, mechanical and permeation properties. *Carbohydrate Polymers* 37(4): 371-382.
- AYRANCI, E.; TUNC, S. 2001. The effect of fatty acid content on water vapour and carbon dioxide transmissions of cellulose-base edible films. *Food Chemistry* 72(2): 231-236.
- BANKS, N. H.; NICHOLSON, S. E. 2000. Internal atmosphere composition and skin permeance to gases of pepper fruit. *Postharvest Biology and Technology* 18(1): 33-41.
- 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(6): 1129-1131.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. 1960. *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons Inc. New York, USA. 780 p.
- BOSQUEZ, E.; VERNON, E. J.; PÉREZ, L.; GUERRERO, I. 2000. Películas y cubiertas comestibles para la conservación en fresco de frutas y hortalizas. *Industria Alimentaria* 22: 14-36.
- CAMERON, A. C.; TALASILA, P. CH.; JOLLES, D. W. 1995. Predicting film permeability needs for modified-atmosphere packaging of lightly processed fruits and vegetables. *HortScience* 30(1): 25-34.
- CHANAMAI, R.; MCCLEMENTS, D. J. 2001. Depletion flocculation of beverage emulsions by gum arabic and modified starch. *Journal of Food Science* 66(3): 457-463.
- CHICK, J.; USTUNOL, Z. 1998. Mechanical and barrier properties of lactic acid and rennet precipitated casein-based edible films. *Journal of Food Science* 63(6): 1024-1027.
- DEBEAUFORT, F.; QUEZADA-GALLO, J. A.; VOILLEY, A. 2000. Edible barriers: a solution to control water migration in foods, pp. 9-16. *In: Food Packaging. Testing Methods and Applications*. RISCH, S. J. (ed.). American Chemical Society. Washington, DC. USA
- DELVALLE, V.; HERNÁNDEZ-MUÑOZ, P.; GUARDA, A.; GALOTTO, M. J. 2005. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry* 91(4): 751-756.
- DÍAZ-SOBAC, R.; VÁZQUEZ-LUNA, A.; BERINSTAIN, C. I.; DE LA CRUZ, J.; GARCÍA, H. S. 1996. Emulsion coating to extend postharvest life of mango (*Mangifera indica* cv. Manila). *Journal of Food Processing and Preservation* 20(3): 191-202.
- EMMAMBUX, N. M.; MINAAR, A. 2003. The effect of edible coatings and polymeric packaging films on the quality of minimally processed carrots. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83(10): 1065-1071.
- GIRARD, M.; TURGEON, S. L.; PAQUIN, P. 2002. Emulsifying properties of whey protein-carboxymethylcellulose complexes. *Journal of Food Science* 67(1): 13-119.
- JANGCHUD, A.; CHINNAN, M. S. 1999. Peanut protein film as affected by drying temperature and pH of film forming solution. *Journal of Food Science* 64(1): 153-157.
- KADER, A. A. 2002. Modified atmosphere during transport and storage, pp. 135-144. *In: Postharvest Technology of Horticultural Crops*. KADER, A.A. (ed.). University of California, Davis, California, USA.
- KESTER, J. J.; FENNEMA O. 1986. Edible films and coatings. *Food Technology* 40(1): 47-59.
- MANGONON, P. L. 1999. *The principles of material selection for engineering design*. Prentice-Hall Inc. New Jersey, USA. 824 p.
- MCHUGH, T. H.; KROCHTA, J. M. 1994. Milk-protein-based edible films and coatings. *Food Technology* 48(1): 97-103.
- RISCH, S. J. 2000. New developments in packaging materials, pp. 1-7. *In: Food Packaging, Testing Methods and Applications*. RISCH, S. J. (ed.). American Chemical Society. Washington, D. C., USA.
- SAS INSTITUTE INC. 1989. *SAS/STAT® User's Guide, Version 6*, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 893 p.
- SOTHORNVIT, R.; KROCHTA, J. M. 2000. Plasticizer effect on oxygen permeability of beta-lactoglobulin films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48 (12): 6298-6302.
- VALLE-GUADARRAMA, S.; SAUCEDO-VELOZ C.; PEÑA-VALDIVIA, C. B.; CORRALES-GARCÍA, J. J. E.; CHÁVEZ-FRANCO, S. H.; ESPINOSA-SOLARES, T. 2002. Skin permeance and internal gas composition in 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) fruits. *Food Science and Technology International* 8(6): 365-373.
- 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.
- ZAMORA-MAGDALENO, M. T.; CAJUSTE-BONTEMPS, J.; COLINAS-LEON, M. T. B.; SANTACRUZ, U. H. 1999. Efecto de daños mecánicos sobre el comportamiento del fruto de aguacate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 5: 319-328 (Núm. Especial).