



Imágenes de: Canva educativo

Recubrimiento biodegradable antifúngico a base de quitosano y aceite esencial de cítricos para la conservación de papaya (*Carica papaya* L.) en poscosecha

Biodegradable antifungal coating based on chitosan and citrus essential oil for the conservation of papaya (*Carica papaya* L.) in postharvest

María del Rosario García-Mateos^{1*}, Joel Corrales-García², Teresita Cornejo-Vivar², Lyzbeth Hernández-Ramos³

RESUMEN

La papaya es una fruta climatérica altamente perecedera. La antracnosis, enfermedad provocada por hongos, es una de las principales causas de pérdida poscosecha. La actividad de extractos vegetales ha permitido la inhibición del desarrollo de microorganismos, en particular se ha reportado la actividad antifúngica de aceites esenciales. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de un recubrimiento biodegradable a base de quitosano con aceite esencial de cítricos, aplicado en etapa poscosecha, en las propiedades físicoquímicas, fisiológicas e inhibición del crecimiento del hongo *Colletotrichum gloeosporioides* en frutos de papaya (*Carica papaya* L.). El recubrimiento se preparó con quitosano, glicerol, ácido acético, aceite esencial de *Citrus reticulata* (0.5 %, 1.0 % y 1.5 %) y Tween[®] 80. La solución se aplicó con una brocha en la epidermis de los frutos de papaya y se almacenaron a temperatura ambiente (24 °C ± 2 °C) por 10 d, junto con los frutos testigo. Las variables evaluadas en los frutos fueron color, pH, sólidos solubles totales (SST), firmeza, pérdida de peso, producción de CO₂, de etileno y daño por antracnosis. Se utilizó un modelo estadístico completamente al azar. Los datos se sometieron al análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias por la prueba de Tukey (P < 0.05). El recubrimiento aplicado retrasó el cambio de color de la epidermis de los frutos de papaya, la pérdida de peso, firmeza y SST respecto a los frutos testigo. Los cambios estuvieron asociados a la modificación de la tasa de respiración y de producción de etileno de los frutos con recubrimiento. La matriz del quitosano conteniendo aceites esenciales, usada como recubrimiento, mejoró significativamente la vida de anaquel de la papaya y disminuyó más del 80 % el daño por antracnosis.

PALABRAS CLAVE: aceite esencial, cítricos, papaya, quitosano, antracnosis.

ABSTRACT

Papaya is a highly perishable climacteric fruit. Anthracnose, a disease provoked by fungus, is one of the main causes of postharvest losses. The activity of plant extracts has allowed the inhibition of the development of microorganisms; in particular, the antifungal activity of essential oils has been reported. The aim of this research was to evaluate the effect of a biodegradable antifungal coating based on chitosan with citrus essential oil in the physicochemical and physiological properties and the antifungal activity of postharvest papaya (*Carica papaya* L.). The coating was prepared with chitosan, glycerol, acetic acid, essential oil of *Citrus reticulata* (0.5 %, 1.0 % and 1.5 %) and Tween[®] 80. The solution was applied with a brush to the epidermis of the postharvest papaya fruits and stored at room temperature (24 °C ± 2 °C) for 10 d. The variables evaluated in the fruits were color, pH, °Brix, firmness, weight loss, production of CO₂ and ethylene and anthracnose damage. An analysis of variance (ANOVA) was performed under a completely randomized design and a comparison of Tukey means (P < 0.05). The coating applied delayed the color change of the epidermis of the papaya fruits, these maintained the high firmness values with respect to the control fruits. The changes were associated with the modification of the respiration rate and ethylene production of the coated fruits. The chitosan matrix containing essential oils used as a coating significantly improved shelf life of papaya and decreased anthracnose damage by 80 %.

KEYWORDS: essential oil, citrus, papaya, chitosan, anthracnose.

*Correspondencia: rosgar08@hotmail.com/Fecha de recepción: 15 de junio de 2022/Fecha de aceptación: 22 de septiembre de 2022/ Fecha de publicación: 31 de enero de 2023.

¹Universidad Autónoma Chapingo, Instituto de Horticultura, Departamento de Fitotecnia, carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. ²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Chapingo, Estado de México, México. ³Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección General de Fomento, Jefatura de Ornamentales, Ciudad de México, México.

INTRODUCCIÓN

Las frutas y hortalizas frescas son productos perecederos, susceptibles a sufrir deterioro físico, fisiológico y bioquímico. Su calidad disminuye durante el manejo poscosecha, lo que afecta la comercialización (Nayak y col., 2019). El deterioro se debe principalmente a daños provocados por insectos, hongos o bacterias. Sin embargo, las pudriciones bacterianas y fúngicas son las que causan la mayor pérdida (Dukare y col., 2018; Singh y col., 2022), ya que alteran la fisiología del fruto, debido en parte, a un incremento de la producción de etileno y de la respiración.

En papaya (*Carica papaya* L.), al igual que en otros frutos tropicales de importancia comercial, la descomposición por antracnosis, debida al hongo *Colletotrichum gloeosporioides*, es la causa más importante de grandes pérdidas económicas (Ayón-Reyna y col., 2017). El género *Carica* agrupa 21 especies (Badillo y Leal, 2019), entre las que destaca *C. papaya* por su importancia comercial (Cunha y col., 2018). Los frutos se caracterizan por ser climatéricos, con altas tasas de respiración y producción de etileno. Su exocarpio es delgado y frágil, por lo tanto, el fruto es perecedero y susceptible al ataque de hongos, con una vida de anaquel corta (1 a 3 semanas), según su manejo (pre y poscosecha) y las condiciones climáticas del lugar de producción (Vela-Gutiérrez y col., 2016).

Para evitar el daño causado por hongos en productos hortofrutícolas, existen estrategias de control, entre las que destaca la aplicación de fungicidas químicos. Sin embargo, su uso se ha restringido debido a los efectos adversos ocasionados en humanos y en el ambiente (Alam y col., 2017). Además de que, la utilización indiscriminada de dichos agroquímicos ha propiciado la generación de fitopatógenos resistentes (Rodríguez-Delgado y col., 2019). Ante esta problemática, se ha iniciado el estudio de fungicidas naturales (extractos vegetales) (Alam y col., 2017).

Sharma y Tripathi (2006) consideran que, dentro de los extractos vegetales, los aceites esen-

ciales obtenidos de cítricos son una alternativa en la industria de alimentos, por su actividad antifúngica, ser de origen natural y amigables con el ambiente. Se ha reportado la incorporación de aceites esenciales a una matriz de recubrimientos biodegradables para el control de microorganismos y aumento de la vida de anaquel de productos hortofrutícolas (Ramos y col., 2010). Una película biodegradable, aplicada por inmersión, sobre un alimento fresco puede permitirle mayor vida de anaquel y conservar su calidad, al regular la migración de humedad, oxígeno y CO₂ sin afectar a los compuestos antioxidantes, aroma y sabor; además de en ocasiones servir también como empaque (Fernández y col., 2015). Los materiales para la elaboración de recubrimientos biodegradables son numerosos, entre ellos destacan los polímeros de origen natural obtenidos mediante el aprovechamiento de productos subutilizados, tales como el quitosano, derivado de la quitina, la cual se obtiene de forma comercial principalmente del caparazón de crustáceos (Philibert y col., 2016). El quitosano es un producto natural no tóxico y biodegradable. Su uso en la conservación de frutas y hortalizas durante el almacenamiento poscosecha, reduce el desarrollo de pudriciones por *Botrytis cinerea*, *Penicillium expansum*, *Penicillium digitatum*, *Aspergillus niger*, *Rhizopus stolonifer*, entre otros (Yuan y col., 2016; Bauer y col., 2022).

El objetivo de esta investigación fue elaborar un recubrimiento biodegradable a base de quitosano adicionado con aceite esencial de cítricos para evaluar su efecto en las propiedades físico químicas, fisiológicas e inhibición del crecimiento de *Colletotrichum gloeosporioides* en frutos de papaya (*Carica papaya* L.) en poscosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Extracción de aceite esencial

Se recolectaron frutos de tres especies de cítricos: naranja (*Citrus sinensis*), mandarina (*Citrus reticulata*), y toronja (*Citrus paradisi*), sin daños físicos o presencia de enfermedades, en el municipio de Tuxpan, Veracruz, México.

La extracción del aceite esencial del exocarpio de cada especie se realizó por hidrodestilación en una trampa Clevenger por 4 h. Las trazas de humedad en los aceites obtenidos se retiraron mediante la adición de Na_2SO_4 anhidro, y se almacenaron en refrigeración a $4\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$. Se calculó el rendimiento (%) de aceite esencial por especie.

Aislamiento de *C. gloeosporioides*

El hongo se aisló de frutos de papaya (*C. papaya* var. Maradol) con lesiones características visuales de antracnosis (círculos concéntricos y mancha oscuras), de acuerdo con lo descrito por Acosta y col. (2001). Los frutos se adquirieron en un mercado local del municipio de Texcoco, Estado de México. Se obtuvieron fragmentos (5 mm x 5 mm) de la superficie infestada de los frutos de papaya. Cada fragmento se sembró en medio de cultivo Papa Dextrosa Agar (PDA, BD Bioxon®), con un periodo de incubación por 3 d, a una temperatura de $28\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ (Acosta y col., 2001). Se tomó una muestra pequeña del hongo y se observó al microscopio (Olympus CX3I, Tokyo, Japón), comparando la forma de micelios y de conidios con los reportados en la literatura (Barnett y col., 1998). Una vez identificado el hongo se procedió a purificar la cepa. Se tomó una muestra del hongo en desarrollo para obtener un cultivo monoconidial, según la técnica de dilución descrita por Acosta y col. (2001), con la finalidad de obtener un inóculo monospórico puro (IP) proveniente de una sola espóra. Cabe mencionar que no se realizó la caracterización molecular del hongo.

Bioensayo *in vitro* de los aceites esenciales

Se utilizó el método de Kirby-Bauer modificado (Bauer y col., 1966). Se colocaron 4 círculos de papel filtro esterilizados (6 mm de diámetros) equidistantes, impregnados con 15 μL de aceite esencial por especie. Se sembró una alícuota de 100 μL de la suspensión de conidios (3.77×10^8 UFC/mL) de la cepa fitopatogena en un medio de cultivo Papa Dextrosa Agar (PDA, BD Bioxon®), según el método descrito por Acosta y col. (2001). Se utilizó agua destilada esterilizada como control negativo y un

fungicida químico Amistar® (azoxistrobin: Metil (E)-2-2-6-(2-cianofenoxi) pirimidin-4-iloifenil-3-metoxiacrilato) como control positivo.

Se realizaron cuatro repeticiones por cada tratamiento, en total se obtuvieron 5 tratamientos, 3 aceites esenciales, un control negativo y un control positivo. Los tratamientos se incubaron a $28\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$. A los 7 d de incubación se midieron los halos de inhibición de crecimiento del hongo (mm) con un pie de rey (Calibrador Vernier® Mitutoyo 530, Kanagawa Japón). Se promediaron 2 diámetros perpendiculares de cada uno de los discos. Se determinó el porcentaje de inhibición (% I) de los aceites esenciales, mediante la fórmula:

$$\% \text{ I} = \left(\frac{\text{Área de crecimiento tratamiento}}{\text{Área de testigo}} \right) * 100.$$

Determinación del grado de desacetilación del quitosano

Se determinó por el método potenciométrico de titulación (Yuan y col., 2016). Se pesaron 0.25 g de quitosano, se le adicionaron 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) 0.3 M y se agitó hasta disolver. La muestra se tituló utilizando hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N, y se midió el cambio de pH por cada mL de NaOH añadido, hasta un volumen igual a 50 mL. Se realizó una gráfica de pH *vs* mL de NaOH y se calculó la diferencia entre los puntos de inflexión de la gráfica. El porcentaje de desacetilación se determinó mediante la ecuación, que expresa la cantidad de grupos aminos (NH_2) formados:

$$\% \text{ NH}_2 = 16.1 (y - x) * (f) (w)$$

Donde:

y: punto de inflexión mayor en la gráfica de la primera derivada.

x: punto de inflexión menor en la gráfica de la primera derivada.

f: normalidad de la solución de NaOH.

w: peso en gramos de la muestra.

16.1: factor cuyo valor está relacionado con el peso equivalente.

Preparación del recubrimiento biodegradable

Las características del quitosano utilizado fueron: peso molecular 127×10^6 g/mol, tamaño de partícula $0.4 \mu\text{m} < 50 \mu\text{m}$, masa 1 mm^3 ; solubilidad $> 99.9 \%$; fuente, caparazón de jaiba (*Callinectes* sp). El recubrimiento se preparó de acuerdo con el método propuesto por Hernández-Ochoa y col. (2011) modificado, mediante la adición de ácido acético glacial 1.0% (v/v) (JT Baker®), glicerol 0.5% (v/v) y quitosano 1.0% (p/v) (proporcionado por el Centro de Investigación y Desarrollo, Sonora, México) a 60°C en agitación constante por 24 h. A la mezcla fría (35°C) se le añadió el aceite esencial con mayor efecto antifúngico, en 3 concentraciones: 0.5% , 1.0% y 1.5% , disuelto con Tween® 80 a 0.1% (v/v). La mezcla se mantuvo en agitación constante por 7 h.

Inoculación del fruto de papaya y aplicación del recubrimiento

Los frutos de papaya (*C. papaya* var. Maradol) de tamaño uniforme ($1\,000 \text{ g}$ a $1\,200 \text{ g}$), sin daños físicos y libre de enfermedades, se obtuvieron de un cultivo de un huerto familiar ubicado en el municipio de San Pedro Pochutla, Oaxaca, México. Los frutos en estado de Maduración 2 (escala de maduración establecida por Santamaría y col. (2009a) se desinfectaron sumergiéndolos en hipoclorito de sodio (1.0% v/v) por 5 min, se enjuagaron con agua destilada esterilizada y se secaron a temperatura ambiente. Se seleccionaron 5 áreas de la epidermis de cada fruto aleatoriamente, para aplicar una punción de aproximadamente 2 mm de profundidad, donde se inocularon $20 \mu\text{L}$ de la suspensión de esporas de *C. gloeosporioides* (1×10^8 conidios mL). Después de 2 h, a la epidermis se aplicó el recubrimiento biodegradable mediante una brocha (Camelus® 2", BYP BCA20, Monterrey, México) y se dejaron secar por 30 min a temperatura ambiente. Se realizaron 4 tratamientos (recubrimiento conteniendo aceite esencial a 0.5% , 1.0% y 1.5% y un tratamiento sin recubrimiento (testigo) con 6 repeticiones cada uno, dispuestos en un diseño completamente al azar. Los frutos se mantuvieron a $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ por 10 d.

Características fisicoquímicas y parámetros de color

La pérdida de peso (%) del fruto y el pH de la pulpa se determinaron de acuerdo con la metodología de la Asociación de Químicos Analíticos Oficial (AOAC, por sus siglas en inglés: Association of Official Analytical Chemist) (AOAC, 1990). El contenido de sólidos solubles totales (SST) se estableció con un refractómetro manual (Atago N1) a $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. El resultado se reportó como porcentaje (%) de sólidos solubles.

El color del fruto se determinó mediante las mediciones de Luminosidad (*L*), ángulo de tono (*Hue*) y pureza de color o índice de cromaticidad (*Chroma*) en tres áreas de la epidermis. Las lecturas de *L*, *a** y *b** se obtuvieron con un colorímetro HunterLab (MiniScan XE Plus45/0-L, Reston, Virginia, EUA) para identificar las diferencias de color en forma numérica. Se realizó el cálculo de los parámetros *Hue* y *Chroma* con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Hue &= \tan^{-1}(a^*/b^*) \\ Chroma &= (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \end{aligned}$$

Las mediciones se realizaron cada 2 d en cada fruto almacenado a $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ por 10 d.

Firmeza del fruto

La firmeza se determinó por el método de punción mediante un texturómetro universal TA.XT2i (Stable Micro Systems UK, Surrey, RU) de base automática, con una punta cónica de 6 mm de diámetros, celda de 5 kg , velocidad de compresión de 0.5 mm/s y distancia de compresión de 10 mm . La firmeza se midió en la parte ecuatorial central de la papaya y se registró la fuerza de oposición del tejido a la penetración del punzón, en cinco regiones del fruto sin exocarpio. Los resultados se reportaron en newtons (N).

Evaluación de la tasa de respiración

Se seleccionaron tres frutos por tratamiento. Los frutos se colocaron en el interior de un frasco de vidrio por 1 h cada 24 h. Con una jeringa se extrajeron 5 mL de gas del espa-

cio de cabeza del frasco, se guardaron en frascos BD Vacutainer® de 5 mL en congelación a - 4 °C hasta su análisis (Santamaría y col., 2009a). Se inyectó 1 mL de cada muestra en un cromatógrafo de gases (Varian® Star 3 400, Palo Alto, California, Estados Unidos), equipado con una columna Hayesep Q 100/120 (1.8 m longitud x 3.2 mm diámetros) y detectores en serie de conductividad térmica (TCD, por sus siglas en inglés: Thermal Conductivity Detector) para la cuantificación del contenido de CO₂, y de ionización de flama (FID, por sus siglas en inglés: Flame Ionization Detector) para la determinación del contenido de etileno. Se utilizó helio como gas acarreador (flujo de 25 mL/min). La temperatura se mantuvo a 70 °C en ambos detectores. Los resultados se calcularon a partir de curvas de calibración con estándares de concentración conocida de CO₂ y etileno. Los resultados se expresaron en mL de CO₂ kg/h y µL de etileno kg/h.

Severidad de daño en el fruto y efectividad de los recubrimientos

Para calcular el porcentaje de severidad de daño en los frutos de papaya se utilizó la fórmula:

$$P = [\sum(n*v) / (CM*N)] * 100$$

Donde:

P = media ponderada de severidad.

n = número de lesiones por cada clase de la escala, esto con respecto a las características de la enfermedad, de acuerdo con grado 5 de daño con base a la escala establecida por Santamaría y col. (2011).

v = valor numérico de cada clase.

CM = categoría mayor.

N = número total de lesiones evaluadas.

Para calcular la efectividad biológica de los recubrimientos (%) se utilizó la fórmula de Abbott (1925):

$$ET = [(IT - it) / IT] * 100$$

Donde:

ET = efectividad del tratamiento.

IT = porcentaje de infección en el testigo.

It = porcentaje de infección en cada tratamiento.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada variable se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) sin restricciones, correspondiendo a un diseño completamente al azar. La comparación de medias se hizo de acuerdo con Tukey (P < 0.05), mediante el Sistema de Análisis Estadístico (SAS, por sus siglas en inglés: Statistical Analysis System) versión 9.1.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de la extracción de los aceites esenciales

El exocarpio de *Citrus reticulata* (mandarina) proporcionó el mayor rendimiento de aceite esencial (0.15 %), seguido de *C. sinensis* (0.07 %) y *C. paradisi* (0.03 %). Lota y col. (2001) reportaron rendimientos de aceite esencial en 15 variedades de *C. reticulata* que fueron de 0.05 % a 0.6 % por kg de cáscara, lo cual concuerda con lo obtenido en la presente investigación. Por otro lado, Rojas-Fernández y col. (2014) mencionaron que la diferencia en los rendimientos de aceite esencial en cítricos se debe principalmente a la variabilidad genética entre especies y al método de extracción. Sin embargo, la composición por especie está también determinada por diferentes factores edafoclimáticos (luz, agua, temperatura, suelo), estacionalidad (temporada de producción y cosecha del fruto) y estado de madurez, que influyen en los procesos fisiológicos y bioquímicos o en las rutas metabólicas donde se sintetizan, produciendo modificaciones estructurales y concentraciones en los componentes del aceite esencial (Boaro y col., 2019).

Bioensayo *in vitro* de los aceites esenciales

El aceite de mandarina (*C. reticulata*) presentó un porcentaje de inhibición de crecimiento del hongo significativamente mayor (P < 0.05) que el de los otros cítricos evaluados y cercano al control positivo (Tabla 1). La diferencia observada de la actividad antifúngica de los aceites esenciales podría explicarse por una diferencia en el perfil o concentración de los metabolitos presentes en cada especie (Rabari y col., 2017). Dutra y col. (2016) reportaron 45 componentes en el aceite esencial de

■ Tabla 1. Halo de inhibición y porcentaje de inhibición *in vitro* de los aceites esenciales del exocarpo del fruto de tres especies de cítricos.

Table 1. Halo of inhibition and percentage of inhibition *in vitro* of the essential oils of the exocarp of the fruit of three citrus species.

Tratamiento	Halo de inhibición (mm)	Inhibición (%)
<i>Citrus sinensis</i> (naranja)	19.4 ^c	23.7
<i>Citrus reticulata</i> (mandarina)	22.8 ^b	32.4
<i>Citrus paradisi</i> (toronja)	15.3 ^d	14.7
Control positivo (fungicida químico)	25.8 ^a	41.4
Control negativo (agua destilada)	0.0 ^e	0.0
DHS	2.8	-

Medias con letras diferentes en una columna difieren significativamente (Tukey, $P < 0.05$). DHS = Diferencia honesta significativa.

Citrus spp y al limoneno como el monoterpeno de mayor abundancia, y en menor proporción α - y β -pineno, linanol y terpineno. Estos autores identificaron a limoneno (94 %) y mircenol (1.6 % a 2.1 %) como los principales componentes del aceite esencial de *C. sinensis*, *C. reticulata* y *C. paradisi*.

Los aceites esenciales de los cítricos evaluados mostraron notables propiedades antimicrobianas (Tabla 1). Aunque su mecanismo de acción aún no es totalmente conocido (Burt, 2004; Bosquez-Molina y col., 2010). Wang y col. (2019) mencionaron que el carácter hidrofóbico de los aceites esenciales se debe a la presencia de los terpenoides volátiles de bajo peso molecular que, de manera sinérgica, pueden interactuar con los fosfolípidos de la membrana celular y de las mitocondrias, aumentando así su permeabilidad, pérdida de la integridad de membrana y la disipación del gradiente de iones, como el Ca^{+2} . En conjunto, todos estos efectos provocan la liberación de otros constituyentes intracelulares que interfieren en muchos procesos biológicos (Sharifi-Rad y col., 2017), induciendo en consecuencia la muerte celular. También se ha reportado que la penetración de los aceites esenciales puede afectar la función de las proteínas y enzimas incrustadas en la membrana (Rabari y col., 2017).

Grado de desacetilación del quitosano

Hernández y col. (2009) indicaron que el va-

lor óptimo de desacetilación para el quitosano debe ser mayor a 50 %, aunque el quitosano comercial presenta un porcentaje de desacetilación superior a 60 %. Esto concuerda con el resultado obtenido de la muestra de quitosano analizado en este estudio que fue de 57.1 %. Al respecto, Araya y Menezes (2010) mencionaron que la variación del grado de desacetilación se debe a la presencia de grupos amino libres en quitosanos de diferentes crustáceos. Por otro lado, Calero y col. (2013), argumentaron que el grado de desacetilación del quitosano, comprendido entre 60 % y 98 %, es un parámetro determinante en la solubilidad o insolubilidad en medios acuosos, ya que se encuentra cargado positivamente en medios ácidos, siendo los grupos amino responsables de dicha densidad de carga (positiva) lo que favorece su solubilidad. Y el carácter hidrofílico e hidrofóbico del quitosano está asociado a las características estructurales que convierten al polímero en excelente estabilizador de emulsiones, además reduce la tensión superficial, actúa como espesante y puede formar películas con mejores propiedades viscoelásticas (Calero y col., 2013).

Características fisicoquímicas del fruto con recubrimiento

Los frutos con recubrimiento mostraron menor pérdida de peso durante los 10 d de almacenamiento, en comparación con los frutos

sin recubrimiento (Tabla 2). A mayor concentración del aceite esencial hubo menor pérdida de peso, aunque solo el tratamiento con 1.5 % de aceite esencial redujo significativamente la pérdida de peso ($P < 0.05$) hasta un valor de 2.90 %. Este efecto podría deberse a que el incremento del contenido de aceite esencial confiere un aumento de la hidrofobicidad del recubrimiento, lo cual disminuye la transpiración y esta a su vez la pérdida de agua, ya que los recubrimientos actúan como una barrera de protección que evita el intercambio de gases con el ambiente, incluyendo al vapor de agua del fruto, lo que provoca una pérdida de peso más lenta (Télles-Pichardo y col., 2013).

En el presente trabajo se observó menor pérdida de peso que lo reportado por Télles-Pichardo y col. (2013), quienes evaluaron recubrimientos de cera de candelilla con polifenoles, aplicados en frutos de papaya almacenados a temperatura ambiente, y la pérdida de peso que encontraron fue aproximadamente de 5 % a partir del día 6. En tanto que, Miranda y col. (2014) obtuvieron pérdidas de peso de 9.54 % en el día 9, al aplicar recubrimientos

a base de almidón de yuca al mismo fruto en condiciones similares de almacenamiento.

El recubrimiento de los frutos no afectó el valor de pH durante su almacenamiento (10 d a temperatura ambiente) (Tabla 2). Martínez-Tenorio y López-Malo (2011) encontraron un pH alcalino en frutos de papaya con recubrimiento y aceites esenciales a los 5 d y 7 d, en comparación con los que no tuvieron recubrimiento. Asimismo, Miranda y col. (2014) reportaron el aumento del pH a partir del día 9. Esto fue atribuido a una reducción del contenido de ácidos orgánicos presentes en el fruto, causado por la desaceleración de la actividad metabólica. El origen de este fenómeno lo atribuyeron a que las películas provocaron menor difusión del oxígeno, lo que pudo ocasionar el decremento de la oxidación metabólica.

El recubrimiento biodegradable con 1.5 % de aceite esencial redujo significativamente ($P < 0.05$) el contenido de sólidos solubles totales en el fruto tratado, con respecto al testigo, a los 10 d de almacenamiento (Tabla 2). Esta disminución podría deberse a la poca permeabilidad de la pared celular por la hidro-

■ Tabla 2. Efecto del recubrimiento en las características fisicoquímicas de la pulpa de papaya durante el almacenamiento ($24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Table 2. Effect of coating on the physicochemical characteristics of papaya pulp during storage ($24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Días de almacenamiento	Tratamiento	Aceite esencial (%)	pH	Pérdida de peso (%)	SST (%)
0	T0	0.0	5.01 ^a	0.0	7.10 ^a
	T1	0.5	5.15 ^a	0.0	7.71 ^b
	T2	1.0	4.92 ^a	0.0	7.80 ^{ab}
	T3	1.5	5.10 ^a	0.0	7.81 ^{ab}
DHS	-	-	0.34	-	0.20
10	T0	0.0	6.29 ^a	4.50 ^b	11.46 ^b
	T1	0.5	5.90 ^a	3.70 ^{ab}	10.46 ^{ab}
	T2	1.0	6.17 ^a	3.50 ^{ab}	11.03 ^{ab}
	T3	1.5	6.50 ^a	2.90 ^a	9.61 ^a
DHS	-	-	0.969	1.094	1.746

T0 = sin recubrimiento; T1 = aceite esencial (0.5 %); T2 = aceite esencial (1.0 %); T3 = aceite esencial (1.5 %). DHS = Diferencia Honesta significativa. SST = sólidos solubles totales.

^{a,b}Medias con letras diferentes en una columna difieren significativamente (Tukey, $P < 0.05$).

fobicidad y mayor concentración del aceite, lo que evitó su ablandamiento y rompimiento de polisacáridos y mayor firmeza de los frutos del T3 (Dos-Passos-Braga y col., 2019). Aunque los cambios de azúcares en los frutos de papaya poscosecha aún no se encuentran completamente establecidos como posibles indicadores de calidad, es importante señalar que, el contenido de SST (10° a 11.5° Brix) permite evaluar el estado de madurez de consumo de la papaya var. Maradol (Santamaría y col., 2009a).

Parámetros de color

En frutos y hortalizas el color es parte de la calidad, por lo mismo, puede ser factor de preferencia, aceptación o rechazo por el consumidor y determinante del fracaso o éxito en la comercialización. En este trabajo, el valor de *Hue*, en la superficie de los frutos sin recubrimiento (testigo), presentó una mayor disminución (aproximadamente 50°) durante el almacenamiento, en comparación con los frutos con recubrimiento (aproximadamente 27°) (Figura 1A y Figura 2). Esta diferencia explica el cambio del color de la epidermis de verde a anaranjado en los frutos sin recubrimiento y de verde a verde-amarillo en los frutos tratados (Figura 2). La manifestación del color naranja durante la maduración de los frutos está relacionada con los cambios en el contenido de pigmentos, principalmente por la degradación de clorofilas, como consecuencia de procesos oxidativos y por la síntesis de otros pigmentos anaranjados y amarillos (carotenoides) (Shakya y Lal, 2018).

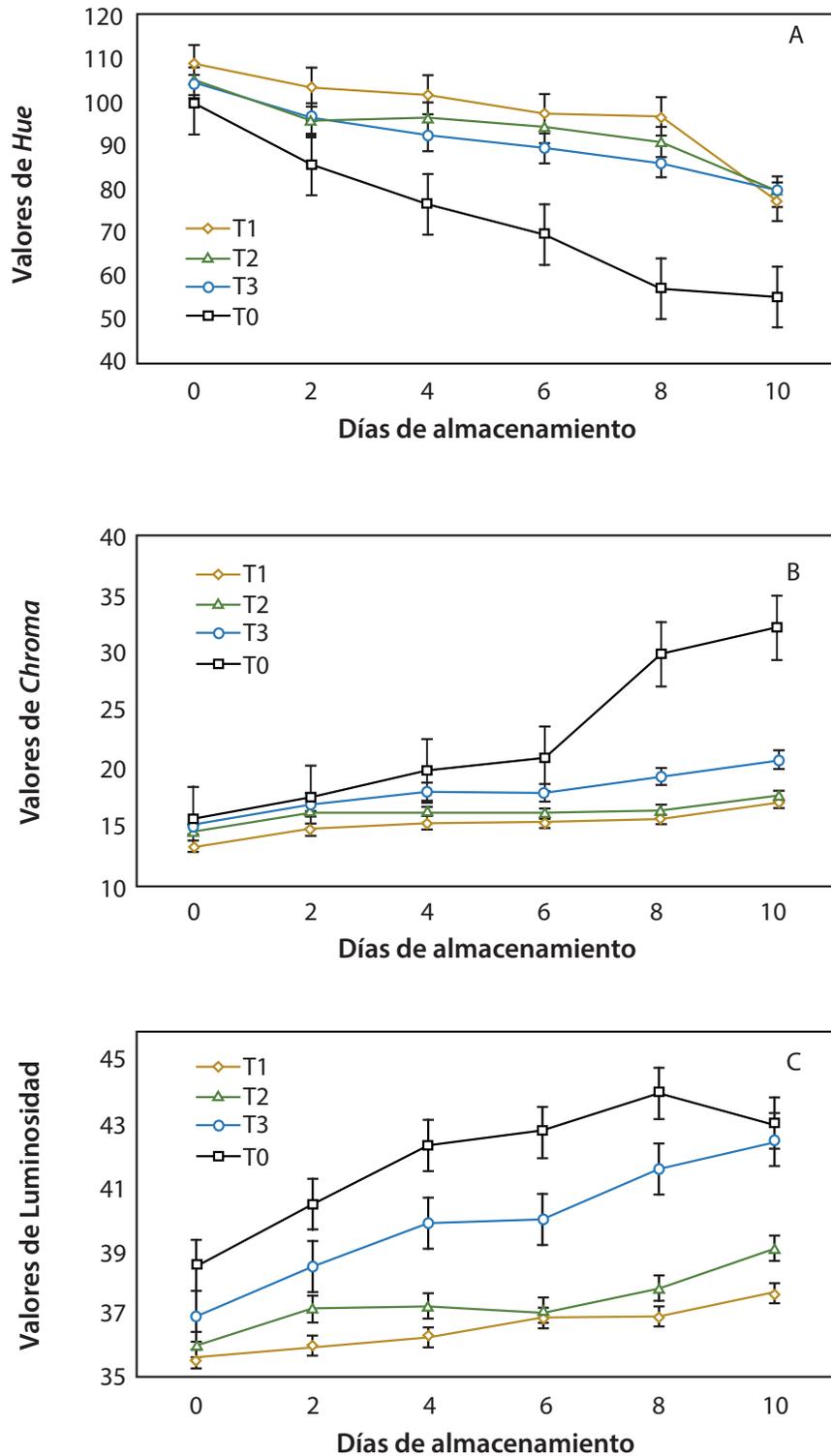
La saturación de color (*chroma*) en la epidermis fue significativamente menor en los frutos con recubrimiento (Figuras 1B y Figura 2), que en los frutos sin recubrimiento después de los 6 d de almacenamiento. Valores mayores de *chroma* indican mayor intensidad de color y significan que el color es más definido. Es importante destacar que, aunque los frutos con recubrimiento mostraron valores bajos de *chroma*, esto no implica que perderán su atractivo para el consumidor, ya que, en esta etapa, el retraso en la instalación del color naranja intenso carac-

terístico del fruto, se asocia con una instalación tardía de la maduración, es decir, una mayor vida de anaquel. El contenido de aceite esencial en el recubrimiento no afectó los valores de *chroma* de la epidermis de los frutos, ya que no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos T1, T2 y T3.

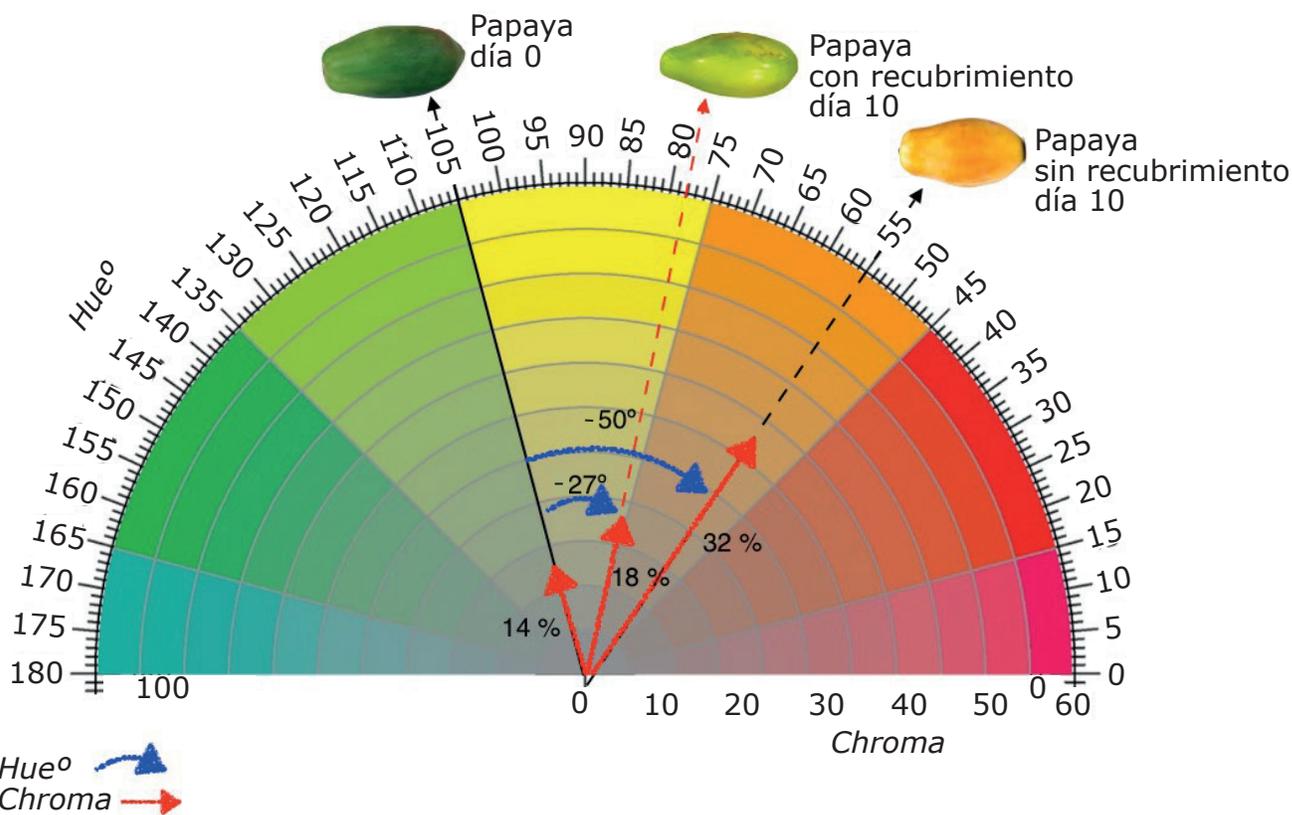
Los valores de luminosidad (*L*) se incrementaron en los 4 tratamientos (T0, T1, T2 y T3) durante el almacenamiento (Figura 1C), pero fue mayor en la fruta sin tratamiento, seguido de la que contenía 1.5 % de aceite esencial (T3). Se observó un incremento en el cambio de color alrededor del día 6 en los frutos sin recubrimiento, que podría estar asociado con un inicio del proceso de maduración. El incremento de luminosidad también fue reportado por Santamaría y col. (2009b) al estudiar la madurez de consumo de papaya maradol después de la cosecha en condiciones de almacenamiento.

Firmeza

Se observó una tendencia decreciente en el valor de firmeza en fruta control (T0) en comparación con los tratamientos con recubrimiento (T1, T2 y T3) durante el almacenamiento. Este efecto está asociado a la maduración de los frutos, que induce su ablandamiento (Barragán-Iglesias y col., 2018), debido al proceso de desorganización de los tejidos; lo que provoca menor resistencia a la deformación. A los 10 d de almacenamiento se observaron diferencias significativas entre los frutos con y sin recubrimiento (Figura 3). Osuna-García y col. (2005) mencionaron que, a mayor retención del valor de firmeza, los frutos presentan mayor vida de anaquel, lo que contribuye, por un lado, a alcanzar mercados más distantes y por el otro a disminuir pérdidas. La firmeza inicial (148 ± 2 N) de los frutos, en todos los tratamientos, resultó similar (144 ± 5 N) a lo reportado por Sañudo y col. (2008). La firmeza de la pulpa de papaya var. Maradol entre 4.7 N y 6.9 N es indicador de madurez de consumo (Santamaría y col., 2009b). Utilizando la escala propuesta por Santamaría y col. (2009b), fue po-

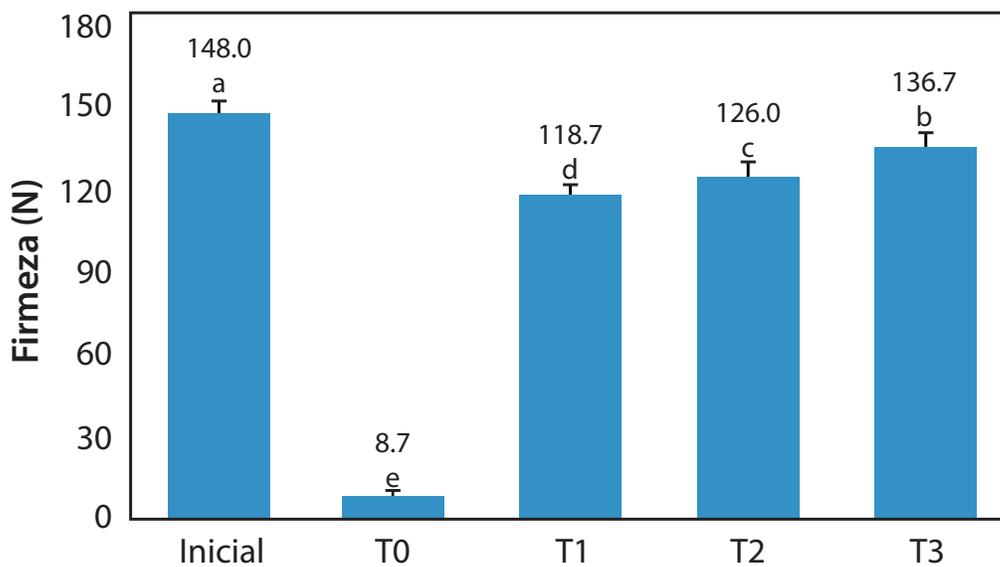


■ Figura 1. Variación en los indicadores de color: A) valores de *hue*; B) valores de *chroma*; C) valores de *L* en papaya durante el almacenamiento.
 Figure 1. Variation in color indicators: A) *hue* values; B) *chroma* values; C) values of *L* in papaya during storage.



■ Figura 2. Variación en los indicadores de color (*hue* y *chroma*) en papaya con y sin recubrimiento a los 0 d y 10 d de almacenamiento.

Figure 2. Variation in color indicators (*hue* and *chroma*) in papaya with and without coating at 0 d and 10 d of storage.



■ Figura 3. Firmeza del fruto de papaya var. Maradol al día 10 de almacenamiento.

Figure 3. Fruit firmness of papaya var. Maradol on day 10 of storage.

sible establecer que, los frutos tratados con las películas alcanzaron a los 10 d una madurez grado 4, menor a la del fruto control (grado 6), lo que indica una prolongación de la vida de anaquel.

Respiración

Los frutos sin recubrimiento presentaron un pico máximo (45.6 mg de CO₂ kg/h) de producción de CO₂ a los 6 d de almacenamiento (Figura 4A). Este patrón de respiración corresponde, como se esperaba, a un fruto climatérico, caracterizado por un patrón oscilatorio en la producción de CO₂ y un aumento en la producción de etileno (Sañudo y col., 2008; Velasco-Ulloa y col., 2012).

La producción de CO₂ fue menor en los frutos con recubrimiento, con diferencias significativas en su tendencia oscilatoria (Figura 4A). El fruto con el T1 presentó un pico máximo en el día 6 y a partir de ahí se mantuvo con la mayor tasa de producción de CO₂. Los frutos con T2 reportaron dos picos elevados los días 2 y 6, y su valor máximo el día 10. En tanto que los frutos con T3 presentaron un pico máximo el día 2 y después de alcanzar su mínimo el día 6 incrementaron su producción de CO₂ hasta alcanzar el máximo el día 10. Este comportamiento sugiere que, aunque no perdieron su característica climatérica, los tratamientos disminuyeron sus tasas de respiración, con producción máxima de 27.9 mg de CO₂ kg/h, retrasando la maduración, lo cual concuerda con los datos observados en los cambios de color, firmeza y SST.

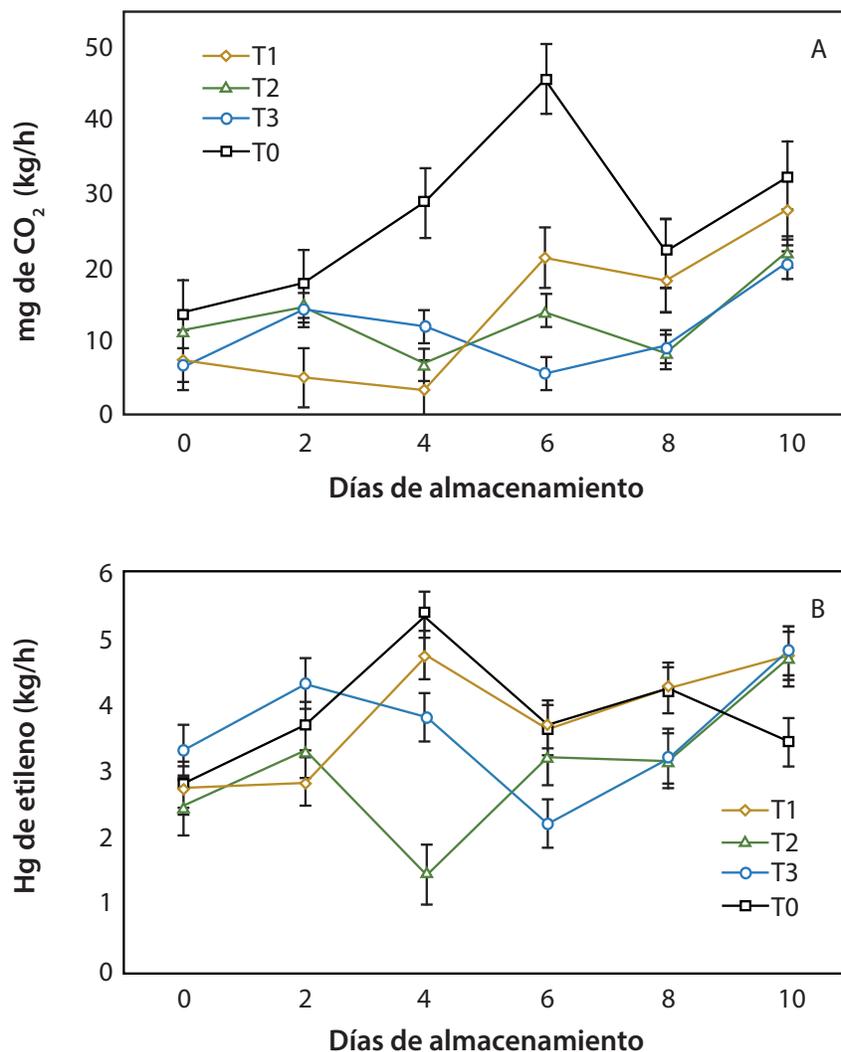
Las concentraciones de CO₂ fueron similares a las reportadas por Mercado-Ruiz y col. (2014), quienes utilizaron una composición diferente de recubrimiento (cera comestible) aplicado a frutos de papaya almacenados a temperatura ambiente por 12 d. Concluyeron que la producción de CO₂ dependió principalmente de la variedad y de los componentes del recubrimiento. En el presente estudio, la aplicación del recubrimiento de quitosano y aceite esencial de cítrico permitió controlar la tasa de producción de CO₂ (Figura 4A). No obstante,

la aplicación de recubrimientos no siempre permite mejorar la vida de anaquel de un producto. Pontigo-Suárez y col. (2015) encontraron que la tasa respiratoria se elevó (165.4 mg de CO₂ kg/h) y con ello la velocidad de maduración, en los frutos con recubrimiento a base de carboximetilcelulosa y aceite esencial de orégano, debido posiblemente al estrés que se provocó en los frutos durante la aplicación del recubrimiento.

La presencia de compuestos activos, añadidos a los recubrimientos, permiten retardar la senescencia del fruto. Esto se atribuye principalmente a la naturaleza hidrofóbica que se confiere al recubrimiento de la barrera física formada; a la modificación de la permeabilidad de la película, lo que permite regular la concentración de O₂ y CO₂ que recibe y libera el fruto; la reducción del número de poros por el cual el vapor de agua y otros gases se intercambian; y a la presencia de compuestos con actividad antioxidante y antifúngica (Télles-Pichardo y col., 2013).

Los recubrimientos en frutos actúan como una barrera semipermeable, modificando el intercambio gaseoso del interior de la fruta con el medio exterior, el recubrimiento provocó una disminución en la tasa respiratoria y transpiración, por lo tanto, una prolongación de la vida poscosecha de producto (Rahimi y col., 2019).

La producción de etileno se muestra en la Figura 4B. Los tratamientos control (T0) y T1 presentaron un comportamiento muy parecido, con un pico de producción de etileno (4.7 μL/kg/h y 5.3 μL/kg/h, respectivamente) a los 4 d, que no fue diferente significativamente ($P < 0.05$). En tanto que, los T2 y T3 presentaron un pico de etileno en el día 2 con disminución gradual al día 4 y 6, respectivamente, para volver a incrementar y alcanzar su máximo nivel. Este comportamiento coincidió con el de la oscilación de la tasa respiratoria que mostraron ambos frutos (Figura 4A). La variación de la producción de etileno en los frutos fue similar a lo reportado por Sañudo y col. (2008); y Santamaría y col. (2009a),



■ Figura 4. Respiración en papaya durante el almacenamiento: A) producción de CO₂; B) producción de etileno.

Figure 4. Papaya respiration during storage: A) CO₂ production; B) ethylene production.

con un patrón respiratorio observado para frutas climatéricas, con oscilaciones constantes durante el periodo de almacenamiento (Sañudo y col., 2008; Velasco-Ulloa y col., 2012).

Efectividad de los recubrimientos en el control *C. gloeosporioides*

La aplicación de los recubrimientos biodegradables en los frutos inoculados con *C. gloeosporioides* mostraron una reducción significativa de los síntomas de la enfermedad con respecto al testigo (mayor al 80 %) (Tabla 3). Las diferentes concentraciones del aceite esencial no mostraron diferencia significativa ($P < 0.05$)

sobre los porcentajes de severidad y efectividad en la inhibición de *C. gloeosporioides*, por lo que, el efecto de los tratamientos posiblemente esté asociado más a la capacidad inhibitoria del quitosano, que de los aceites. El efecto inhibitor de este polímero depende de su concentración, el grado de polimerización de la cadena de glucosamina, el grado de desacetilación (en este estudio de 18.2 ± 2.9), el porcentaje de acetilación (57.1 %) e incluso, el tiempo de exposición sobre la célula fúngica (Hernández-Lauzardo y col., 2005). Es importante considerar que los hongos presentan diferente sensibilidad al quitosano y esto pue-

■ **Tabla 3. Síntomas en frutos, porcentajes de severidad y de efectividad de los recubrimientos en frutos de papaya inoculados con *C. gloeosporioides*.**

Table 3. Symptoms in fruits, percentages of severity and effectiveness of coatings in papaya fruits inoculated with *C. gloeosporioides*.

Tratamiento	Síntomas en frutos	Severidad (%)	Efectividad (%)
T0	Mancha circular, hundida, acuosa, color gris-negro	97.1 ^a	0.0 ^a
T1	Mancha irregular, superficial, seca, color gris	16.8 ^b	80.7 ^b
T2	Mancha irregular, superficial, seca, color gris	18.8 ^b	84.0 ^b
T3	Mancha irregular, superficial, seca, color gris	17.1 ^b	82.4 ^b
DHS	-	13.1	14.9

T0 = sin recubrimiento; T1 = aceite esencial a 0.5 %; T2 = aceite esencial a 1.0 % y T3 = aceite esencial a 1.5 %.
^{a,b}Medias con letras diferentes en una columna difieren significativamente (Tukey, $P < 0.05$).

de ser debido a la composición de fosfolípidos de membrana y particularmente a la naturaleza de sus cargas (Palma-Guerrero y col., 2008; Ramos y col., 2010). La interacción del quitosano con los grupos de cabeza de fosfolípidos cargados o las proteínas que componen la pared celular permite su capacidad para entrar e interactuar con el ADN y con ello, alterar su conformación e inhibir la síntesis de ARN y de proteína (El-Ghaouth y col., 1992; Hernández-Lauzardo y col., 2005). El uso del quitosano para el control de las enfermedades poscosecha promete ser una nueva alternativa de conservación de los productos hortícolas durante el almacenamiento sin riesgos ecológicos; sin embargo, es necesario continuar profundizando en los diferentes aspectos básicos que contribuyen a explicar el efecto de la aplicación de este biopolímero en las frutas y hortalizas. Dos-Passos-Braga y col. (2019) reportaron una disminución de 49 % a 100 %, en los síntomas de antracnosis en papaya, a $25\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$ durante 10 d, con un recubrimiento a base de quitosano (5 mg/mL) y aceite esencial de *Mentha piperita* L (1.25 $\mu\text{L/mL}$). En este estudio la disminución de síntomas de antracnosis varió de 80.7 % a 84 %, almacenados a una temperatura de $24\text{ °C} \pm 0.2\text{ °C}$ durante 10 d (Tabla 3).

Los porcentajes de control del hongo para los frutos con recubrimiento fueron de 60 %. Los

resultados fueron similares a lo reportado por Bosquez-Molina y col. (2010), quienes lograron reducir 60 % la antracnosis en papayas con recubrimiento adicionado con aceite esencial de limón mexicano a 0.1 %. Los mismos autores observaron que la concentración de aceite esencial utilizado en la formulación del recubrimiento no fue un factor determinante en la reducción del desarrollo del hongo.

Integridad del recubrimiento

En todos los tratamientos con recubrimiento se observó un desprendimiento del mismo a los 10 d de almacenamiento (Figura 5). Varios factores pudieron ocasionar el desprendimiento, como la pérdida de peso del fruto, la naturaleza química de los componentes del recubrimiento y/o la concentración del aceite esencial en la formulación del recubrimiento. Pontigo-Suárez y col. (2015) observaron a los 7 d, el desprendimiento de los recubrimientos aplicados en papaya a base de carboximetilcelulosa y aceite esencial de clavo y canela, matriz diferente a la evaluada en la presente investigación. Por lo tanto, se requieren más estudios para mejorar las condiciones de aplicación de este tipo de recubrimientos en frutas y hortalizas, así como, evaluar las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y térmicas que pudieran condicionar la calidad del fruto en relación con su vida de anaquel y preferencias de los consumidores.



■ **Figura 5.** Desprendimiento del recubrimiento biodegradable de la superficie de papaya al día 10 de almacenamiento.

Figure 5. Detachment of the biodegradable coating frontis surface in the papaya on day 10 storage.

CONCLUSIONES

El aceite esencial de *Citrus reticulata* registró mejor rendimiento y mayor actividad antifúngica *in vitro* contra *Colletotrichum gloeosporioides* en comparación con los aceites de *C. sinensis* y *C. paradisi*. Los frutos con recubrimiento presentaron mayor vida de anaquel respecto al control, el cual alcanzó su madurez en los 10 d que duró el estudio. El uso de recubrimientos biodegradables, combinando quitosano con aceite esencial de *C. reticulata*, aplicados en frutos de papaya en etapa postcosecha, demostró ser eficaz, por lo que po-

dría ser una alternativa para darles mayor vida de anaquel por su capacidad de controlar la antracnosis, disminuir la pérdida de peso y firmeza, y retrasar el cambio de color de verde a anaranjado de la epidermis del fruto sin afectar la producción de sólidos solubles totales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de la presente investigación agradecen al Centro de Investigación y Desarrollo, Sonora, México, por la donación de quitosano para elaborar el recubrimiento utilizado como parte del objetivo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Abbott, W. S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*. 18(2): 265-267.
- Acosta, R. M., Nieto-Ángel, D., Domínguez-Álvarez, J. L. y Delgadillo-Sánchez, F. (2001). Calidad y tolerancia en frutos de papaya (*Carica papaya* L.) a la inoculación del hongo *Colletotrichum gloeosporioides* Penz., en postcosecha. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 7(1): 119-124.
- Alam, A., Tripathi, A., Sharma, V., and Sharma, N. (2017). Essential oils: A novel consumer and ecofriendly approach to combat postharvest phytopathogens. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*. 11(1): 1-16.
- AOAC, Association of Official Analytical Chemist (1990). *Official Methods of Analysis*. (Thirteenth edition). Washington D.C., USA: AOAC.1023 Pp.
- Araya, A. y Meneses, L. (2010). Influencia de algunos ácidos sobre las propiedades Físico-químicas de películas de quitosano obtenidas a partir de desechos de cangrejo. *Revista Tecnológica ESPOL*. 23(1): 143-148.
- Ayón-Reyna, L. E., González-Robles, A., Rendón-Maldonado, J. G., Báez-Flores, M. E., López-López, M. E., and Vega-García, M. O. (2017). Application of a hydrothermal calcium chloride treatment to inhibit postharvest anthracnose development in papaya. *Postharvest Biology and Technology*. 124: 85-90.
- Badillo, V. M. and Leal, F. (2019). Taxonomy and botany of the Caricaceae. *Horticultural Reviews*. 47: 289-323.
- Barnett, H. L. and Hunter, B. B. (1998). *Illustrated Genera of Imperfect Fungi*. (Fourth edition). APS Press, St. Paul. 218 Pp.
- Barragán-Iglesias, J., Méndez-Lagunas, L. L., and Rodríguez-Ramírez, J. (2018). Ripeness indexes and physicochemical changes of papaya (*Carica papaya* L. cv. Maradol) during ripening on-tree. *Scientia Horticulturae*. 236: 272-278.
- Bauer, A. W., Kirby, M. M., Sherris, J. C., and Turck, M.

- (1966). Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American Journal Clinical Pathology*. 45:493-496.
- Bauer, J. L., Villegas, L. F., and Zucchetti, A. (2022). Applications of chitosan in agriculture, industry, and health. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science*. 2(2): 37-45.
- Boaro, C. S. F., Vieira, M. A. R., Campos, F. G., Ferreira, G., Chacón, I. D. C., and Marques, M. O. M. (2019). Factors influencing the production and chemical composition of essential oils in aromatic plants from Brazil, in *Essential Oil Research*. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16546-8_2. Fecha de consulta: 20 de enero de 2020.
- Bosquez-Molina, E., Ronquillo-de-Jesús, E., Bautista-Baños, S., Verde-Calvo, J. R., and Morales-López, J. (2010). Evaluation of the inhibitory effect of essential oils against *Colletotrichum gloeosporioides* and *Rhizopus stolonifer* in stored papaya fruit and their possible application in coatings. *Postharvest Biology and Technology*. 57(2): 132-137.
- Burt, S. A. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods – a review. *International Journal of Food Microbiology*. 94: 223-253.
- Calero, N., Muñoz, J. y Guerrero, A. (2013). Efecto del pH en emulsiones o/w formuladas con proteína de patata y quitosano. *Grasas y Aceites*. 64(1):15-21.
- Cunha, M., Passos, F. R., Mendes, F. Q., Pigozzi, M. T., and Carvalho, A. M. X. (2018). Propolis extract from different botanical sources in postharvest conservation of papaya, in *Acta Scientiarum. Technology*. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.31074>. Fecha de consulta: 20 de enero de 2020.
- Dos-Passos-Braga, S., Lundgren, G. A., Macedo, S. A., Tavares, J. F., dos-Santos-Vieira W. A., Câmara, M. P. S., and de-Souza, E. L. (2019). Application of coatings formed by chitosan and Mentha essential oils to control anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides* and *C. brevisporum* in papaya (*Carica papaya* L.) fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*. 139: 631-639.
- Dukare, A. S., Paul, S., Nambi, V. E., Gupta, R. H., Singh, R., Sharma, K., and Vishwakarma, R. K. (2018). Exploitation of microbial antagonists for the control of postharvest diseases of fruits: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 59(9):1498-1513.
- Dutra, K., de-Oliveira, J. V., Navarro, D. M. D. A. F., and Santos, J. P. O. (2016). Control of *Callosobruchus maculatus* (FABR.) (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) in *Vigna unguiculata* (L.) WALP. with essential oils from four *Citrus* spp. plants. *Journal of Stored Products Research*. 68: 25-32.
- El-Ghaouth, A., Arul, J., Asselin, A., and Benhamou, N. (1992). Antifungal activity of chitosan on post-harvest pathogens: induction of morphological and cytological alterations in *Rhizopus stolonifer*. *Mycological Research*. 96:769-772.
- Fernández, V., Bautista, B., Fernández, V., Ocampo, R., García, P. y Falcón, R. (2015). Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 24(3): 52-57.
- Hernández, C. H., Águila, A. E., Flores, A. O., Viveros, N., E. L. y Ramos, C. E. (2009). Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón. *Superficies y Vacío*. 22(3): 57-60.
- Hernández-Lauzardo, A. N., Bautista-Baños, S., Velázquez-del-Valle, M. G., Rodríguez-Ambriz, A. L., Corona-Rangel, M. L., Solano-Navarro, A. y Bosquez-Molina, E. (2005). Potencial del quitosano en el control de las enfermedades poscosecha. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 23(2):198-205.
- Hernández-Ochoa, L., Gonzáles-Gonzáles, A., Gutiérrez-Méndez, N., Muñoz-Castellanos, L. N. y Quintero-Ramos, A. (2011). Estudio de la actividad antibacteriana de películas elaboradas con quitosano a diferentes pesos moleculares incorporando aceites esenciales y extractos de especias como agentes antimicrobianos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 10(3):455-463.
- Lota, M. L., Serra, D. R., Tomi, F., and Casanova, J. (2001). Chemical variability of peel and leaf essential oils of 15 species of mandarins. *Journal of Applied Polymer Science*. 112: 2166-2178.
- Martínez-Tenorio, Y. y López-Malo, V. (2011). Envases activos con agentes antimicrobianos y su aplicación en los alimentos. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*. 5(2):1-12.
- Mercado-Ruiz, J. N., Guzmán-Reyes, I. C., García-Robles, J. M., Salinas-Hernández, R. M. y Báez-Sañudo, R. (2014). Efecto del recubrimiento con ceras comestibles en fruto de papaya (*Carica papaya* L.) sobre su calidad durante el almacenamiento. *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha*. 15(1): 31-40.
- Miranda, A. D., Alvis, A. y Arrazola, G. (2014). Efectos de dos recubrimientos sobre la calidad de la papaya (*Carica papaya* L.) variedad Tainung. *Temas Agrarios*. 19(1): 7-18.
- Nayak, S. L., Sethi, S., Sharma, R. R., and Prajapati, U. (2019). Active edible coatings for fresh fruits and vegetables. In T. Gutiérrez (Ed.), *Polymers for AgriFood Applications* (pp. 417-432). USA. Springer International Publishing, Cham.
- Osuna-García, J. A., Beltrán, J. A. y Pérez-Barraza, M. H. (2005). Mejoramiento de vida de anaquel y calidad de pa-

paya "Maradol" con 1-metilciclopropeno (1-MCP). *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 11(1): 7-12.

Palma-Guerreo, J., Jansson, H., Salinas, J., and López-Llorca, L. (2008). Effect of chitosan on hyphal and spore germination of plant pathogenic and biocontrol fungi. *Journal of Applied Microbiology*. 104(2): 541-553.

Philibert, T., Lee, B. H., and Fabien, N. (2016). Current Status and New Perspectives on Chitin and Chitosan as Functional Biopolymers. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 181(4): 1314-1337.

Pontigo-Suárez, A. G., Trejo-Márquez, M. A. y Lira-Vargas, A. A. (2015). Desarrollo de un recubrimiento con efecto antifúngico y antibacterial a base de aceite de orégano para conservación de papaya maradol. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 16(1): 58-63.

Rabari, V. P., Chudashama, K. S., and Thaker V. S. (2017). *In vitro* Screening of 75 Essential Oils Against *Colletotrichum gloeosporioides*: A Causal Agent of Anthracnose Disease of Mango. *International Journal of Fruit Science*. 18(1): 1-13.

Rahimi, R., ValizadehKaji, B., Khadivi, A., and Shahrjerdi, I. (2019). Effect of chitosan and thymol essential oil on quality maintenance and shelf-life extension of peach fruits cv. 'Zaferani'. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*. 2(2): 143-156.

Ramos, G. M., Bautista, B. S., Barrera, N. L., Bosquez, M. E., Alia, T. I. A. y Estrada, C. M. (2010). Compuestos antimicrobianos adicionados en recubrimientos comestibles para uso en productos hortofrutícolas. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 28(1): 44-57.

Rojas-Fernández, M. M., Corzo-López, M., Sánchez-Pérez, Y., Brito, D., Montes-de-Oca, R., Martínez, Y. y Pino-Pérez, O. (2014). Actividad antibacteriana de aceites esenciales sobre *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*. *Revista Protección Vegetal*. 29(3): 197-203.

Rodríguez-Delgado, M. M., Martínez-Ledezma, C., and Villarreal-Chiu, J. F. (2019). Advances in biocoatings for nanoparticles and biodegradable delivery systems in agriculture and food industry: Toward a safer and eco-friendly nanotechnology. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-17061-5_14. Fecha de consulta: 21 de enero de 2020.

Sharifi-Rad, J., Sureda, A., Tenore, J. C., Daglia, M., Sharifi-Rad, M., Valussi, M., ..., and Iriti, M. (2017). Biological activities of essential oils: From plant chemoeology to traditional healing systems. *Molecules*. 22(1): 70.

Sharma, N. and Tripathi, A. (2006). Fungitoxicity of the essential oil of *Citrus sinensis* on post-harvest pathogens. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 22(6): 587-593.

Santamaría, B. F., Díaz, P. R., Gutiérrez, A. O., Santa-maría, F. J. y Larqué, S. A. (2011). Control de dos especies de *Colletotrichum* causantes de antracnosis en frutos de papaya maradol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2(5): 631-643.

Santamaría, B. F., Díaz, P. R., Sauri, D. E., Espadas, G. F., Santamaría, J. M. y Larqué, S. A. (2009b). Características de calidad de frutos de papaya maradol en la madurez de consumo. *Agricultura Técnica en México*. 35(3): 347-353.

Santamaría, B. F., Sauri, D. E., Espadas, G. E., Díaz, P. R., Larqué, S. A., and Santamaría, J. M. (2009a). Postharvest ripening and maturity indexes for maradol papaya. *Interciencia*. 34(8): 583-588.

Sañudo, B. J. A., Siller, C. J., Osuna, E. T., Muy, R. M., López, A. G. y Labavitch, J. (2008). Control de la maduración en frutos de papaya (*Carica papaya* L.) con 1-metilciclopropeno y ácido 2-cloroetil fosfónico. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31(2): 141-147.

Shakya, R. and Lal, M. A. (2018). Fruit Development and Ripening. In *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Springer, Singapur. 857-883 Pp.

Singh, M., Pandey, K. D., Rathore, A. C., Sharma, S. P., and Kumar, R. (2022). Bacterial antagonists: Effective tools for the management of postharvest diseases in fruits, vegetables, and food grains. In A. Kumar (Ed.), *Microbial Biocontrol: Food Security and Post-Harvest Management* (pp. 259-309). USA. Springer International Publishing, Cham.

Télles-Pichardo, R., Cruz-Aldaco, K., Ochoa-Reyes, E., Aguilar, C. N. y Rojas, R. (2013). Cubiertas comestibles de cera y polifenoles de candelilla: una alternativa de conservación de papaya (*Carica papaya* L.). *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. 5(10): 1-7.

Vela-Gutiérrez, G., Del-Ángel-Coronel, O. A., Cabrera-Ponce, J. L., Gómez-Lim, M. A. y García-Galindo, H. S. (2016). Transformación de embriones de papaya maradol (*Carica papaya* L.) con el gen 9/13 de la lipoxigenasa. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*. 4(22): 1-14.

Velasco-Ulloa, B., Mercado-Ruiz, J. N., García-Robles, J. M. y Báez-Sañudo, R. (2012). Respuesta física y fisiológica a la aplicación de cera comestible en mangos (*Mangifera indica* L.) cvs. *Tommy Atkins* y *Keitt*. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 13(2): 130-139.

Wang, D., Zhang, J., Jia, X., Xin, L., and Zhai, H. (2019). Antifungal effects and potential mechanism of essential oils on *Colletotrichum gloeosporioides* *in vitro* and *in vivo*. *Molecules*. 24(18): 3386.

Yuan, G., Chen, X., and Li, D. (2016). Chitosan films and coatings containing essential oils: The antioxidant and antimicrobial activity, and application in food systems. *Food Research International*. 89: 117-128.