

**TIP Revista Especializada en
Ciencias Químico-Biológicas**

TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas

ISSN: 1405-888X

ISSN: 2395-8723

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de
Estudios Superiores, Plantel Zaragoza

Anaya-Esparza, Luis M.; Pérez-Larios, Alejandro; Ruvalcaba-Gómez, José M.;
Sánchez-Burgos, Jorge A.; Romero-Toledo, Rafael; Montalvo-González, Efigenia

Funcionalización de los recubrimientos a base de quitosano
para la conservación postcosecha de frutas y hortalizas

TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, vol. 23, e20200241, 2020
Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores, Plantel Zaragoza

DOI: 10.22201/fesz.23958723e.2020.0.241

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43266574017>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

PUBLICACIÓN CONTINUA

ARTÍCULO DE REVISIÓN

© 2020 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).
TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 23: 1-14, 2020.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.241>

Funcionalización de los recubrimientos a base de quitosano para la conservación postcosecha de frutas y hortalizas

Luis M. Anaya-Esparza^{1,2}, Alejandro Pérez-Larios²,
José M. Ruvalcaba-Gómez³, Jorge A. Sánchez-Burgos¹,
Rafael Romero-Toledo⁴ y Efigenia Montalvo-González^{1*}

^{1,2}Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Tepic. Av. Tecnológico # 255 Fracc. Lagos del Country, Tepic 63175, Nayarit, México.

²División de Ciencias Agropecuarias e Ingenierías, Centro Universitario de los Altos, Universidad de Guadalajara, Tepatitlán de Morelos 47600, Jalisco, México. ³Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Tepatitlán de Morelos 47600, Jalisco, México. ⁴Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Guanajuato 36050, Guanajuato, México. E-mail: *emontalvo@itteplic.edu.mx

RESUMEN

En años recientes, se ha buscado el desarrollo y aplicación de recubrimientos comestibles que sean seguros, biodegradables y con adecuadas propiedades tecnológicas y funcionales que ayuden a extender la vida de anaquel de frutas y hortalizas. El quitosano es uno de los biomateriales con mayor potencial para la elaboración de recubrimientos comestibles. Sin embargo, su principal desventaja es la alta permeabilidad al vapor de agua que exhibe, por lo que, una alternativa para mitigar esta limitante, es su funcionalización mediante la incorporación de compuestos orgánicos (aceites esenciales, extractos naturales, ácido ascórbico, hidrolizados de proteína, polisacáridos) e inorgánicos (SiO₂, TiO₂, ZnO, Ag y montmorillonita), además, de la adición de microorganismos (levaduras) a la matriz polimérica. El quitosano funcionalizado, aplicado a productos hortofrutícolas, ha mostrado mejores resultados (mayor vida de anaquel y cambios mínimos en parámetros de calidad) que los obtenidos al emplear quitosano sin funcionalizar. El objetivo de esta revisión es describir y discutir los beneficios y limitaciones de la funcionalización del quitosano y su aplicación en productos hortofrutícolas.

Palabras clave: recubrimientos comestibles, quitosano, funcionalización, protección, frutas y hortalizas, vida de anaquel.

Functionalization of edible coating chitosan-based for fruits and vegetables postharvest preservation

ABSTRACT

In recent years, the development and application of safe and biodegradable edible coatings, with superior technological and functional properties have been studied to extend the shelf life of fresh fruit and vegetables. Chitosan is one of the most promising biomaterials for the development of edible coatings. However, the main disadvantage of this polysaccharide is related to the high water vapor permeability that it presents, therefore, an alternative to improve its performance, is its functionalization through the incorporation of organic (essential oils, natural extracts, ascorbic acid, protein hydrolysates, and polysaccharides) and inorganic compounds (SiO₂, TiO₂, ZnO, Ag, and montmorillonite), but also, the addition of microorganisms (yeast) in the chitosan matrix. The application of edible functionalized-chitosan coatings on fruits and vegetables has given better results (significant prolongation of the shelf life and minimal changes in quality parameters) than those obtained when pure chitosan-coating was applied. This review describes the advantages and limitations of functionalization of edible chitosan films in the preservation of post-harvest of fruit and vegetables.

Keywords: edible coatings, chitosan, functionalization, protection, fruits and vegetables, shelf life.

INTRODUCCIÓN

Las frutas y hortalizas son tejidos vivos que están expuestos a un deterioro progresivo después de ser cosechados, ocasionado tanto por factores intrínsecos (fisiológicos y bioquímicos) como por factores extrínsecos (manejo, transporte y almacenamiento), además de la interacción con microorganismos patógenos causantes de distintas enfermedades en los mismos (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA por sus siglas en inglés) (USDA, 2016). En este sentido, se estima que las pérdidas postcosecha a nivel mundial de frutas y hortalizas se sitúan entre el 30 y 50 % de la producción total (Porat, Lichten, Terry, Harker & Buzby, 2018), por lo que, su conservación representa un reto a nivel mundial (USDA, 2016; Rodríguez-Guzmán, González-Estrada, Bautista-Baños & Gutiérrez-Martínez, 2019). Con esta finalidad se han desarrollado y aplicado diversas tecnologías (bajas temperaturas, empaques con atmósferas modificadas, envasado al vacío y aditivos químicos), entre ellas la aplicación de recubrimientos comestibles, que actúan como una barrera física que protege al fruto de los factores ambientales, prolonga su vida de anaquel y le confiere valor agregado a los productos hortofrutícolas (USDA, 2016).

Los recubrimientos comestibles pueden ser elaborados a partir de proteínas, lípidos y/o polisacáridos. Los polisacáridos como el almidón, celulosa, pectina, alginato y quitosano destacan como los materiales más empleados para su elaboración (Rinaudo, 2014; Solano-Doblado, Alamilla-Beltrán & Jiménez-Martínez, 2018). Debido a sus propiedades antimicrobianas y de inducción de mecanismos de defensa en frutos, así como a sus propiedades tecnológicas (solubilidad, compatibilidad con compuestos orgánicos e inorgánicos y habilidad para formación de recubrimientos), el quitosano es una de las alternativas viables para la elaboración de recubrimientos comestibles (Berumen-Varela, Coronado-Partida, Ochoa-Jiménez, Chacón-López & Gutiérrez-Martínez, 2015; Bautista-Baños, Ventura-Aguilar, Correa-Pacheco & Corona-Rangel, 2017).

Investigaciones recientes se han centrado en la funcionalización del quitosano para la conservación de frutas y hortalizas, con lo que se ha demostrado que la incorporación de diversos compuestos orgánicos, inorgánicos y/o biológicos dentro de la matriz del quitosano ha mejorado y/o potencializado las propiedades tecnológicas y funcionales de este tipo de recubrimientos (permeabilidad al vapor de agua e intercambio de gases, propiedades mecánicas, actividad antimicrobiana y antioxidante), con lo que se han obtenido mejores resultados en términos de conservar la calidad de los frutos en los que se han utilizado, en comparación con la aplicación individual del quitosano o en frutos sin recubrimiento (Gol, Patel & Ramana-Rao, 2013; Fortunati *et al.*, 2017; Hajji, Younes, Affes, Boufi & Nasri, 2018). El objetivo de esta revisión fue recopilar, describir y discutir los beneficios y limitaciones de la funcionalización

con compuestos orgánicos, inorgánicos y/o biológicos de los recubrimientos comestibles a base de quitosano y su aplicación en productos hortofrutícolas.

TECNOLOGÍAS DE CONSERVACIÓN E ÍNDICES DE CALIDAD EN FRUTOS POSTCOSECHA

En la actualidad, se han estudiado diversas tecnologías para prolongar la vida útil de los productos hortofrutícolas como el uso de bajas temperaturas (refrigeración y congelación), inmersión en aditivos químicos, atmósferas modificadas, envasado al vacío y recubrimientos comestibles (de manera individual o en combinación). La finalidad de estas tecnologías es minimizar las pérdidas ocasionadas durante el manejo, transporte y almacenamiento postcosecha de los productos hortofrutícolas (USDA, 2016).

Actualmente, existen diversos índices utilizados para determinar la calidad de los productos hortofrutícolas y cambios postcosecha, los más importantes tienen relación con los parámetros fisiológicos (tasa de respiración y la producción de etileno), microbiológicos (presencia de microorganismos patógenos), físicos (pérdida de peso y firmeza) y fisicoquímicos (pH, acidez titulable y sólidos solubles totales) de los frutos (USDA, 2016). Asimismo, debe considerarse que durante y después de la cosecha, se pueden presentar cambios fisiológicos importantes en los frutos, algunos de estos son dependientes de la presencia de oxígeno, por ejemplo, la presencia de microorganismos fitopatógenos en la superficie del fruto puede promover un aumento en la tasa de respiración y la producción de etileno, lo que conduce a una mayor emisión de calor, incremento en la tasa metabólica y de descomposición en el fruto (USDA, 2016). Por lo que, una alternativa para minimizar estas reacciones metabólicas es la aplicación de recubrimientos comestibles (Bautista-Baños *et al.*, 2017; Solano-Doblado *et al.*, 2018). Adicionalmente, debe considerarse que cada tecnología tiene sus propias ventajas y limitaciones, ya que la eficacia de los tratamientos de conservación depende directamente de la interacción fruto-contaminación-almacenamiento (USDA, 2016).

ASPECTOS GENERALES DE LOS RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES

Los recubrimientos comestibles son matrices complejas que, aplicadas al fruto, funcionan como una barrera protectora frente a factores ambientales (contaminación y microorganismos patógenos), y a su vez como una membrana semipermeable que permite el intercambio de gases (reducción de la disponibilidad de O_2 e incremento de CO_2), lo que favorece la creación de una atmósfera modificada entre el fruto y el recubrimiento que, principalmente, desacelera el metabolismo natural de los productos hortofrutícolas (tasa de respiración, producción de etileno), lo que resulta en una menor deshidratación y pérdida fisiológica de peso de los mismos (USDA, 2016; Solano-Doblado *et al.*, 2018; Hajji *et al.*, 2018; Jiao *et al.*, 2019).

Un recubrimiento comestible es una capa delgada formada sobre el alimento, que puede ser aplicada por inmersión o aspersión (Solano-Doblado *et al.*, 2018; Jiao *et al.*, 2019). Estos pueden ser elaborados a partir de proteínas, lípidos y/o polisacáridos (solos o en combinación) provenientes de diferentes fuentes naturales (exoesqueleto de crustáceos, proteínas de soya y leche, almidón, pectinas, mucílago de nopal y gomas naturales) (Rinaudo, 2014; Solano-Doblado *et al.*, 2018). La elección del material con el que se elaboran los recubrimientos estará en función del desempeño y características intrínsecas de cada material, como lo son costos, disponibilidad, propiedades mecánicas (tensión y flexibilidad) y ópticas (brillo, opacidad, transparencia), estabilidad, solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y capacidad de intercambio de gases, adherencia al fruto y protección contra microorganismos patógenos o los asociados al deterioro del fruto. Dichos recubrimientos, deberán ser inocuos, biodegradables, incoloros e insípidos (USDA, 2016). Con base en esos criterios, uno de los materiales preferidos para este fin son los polisacáridos, de entre los cuales destaca el quitosano (Solano-Doblado *et al.*, 2018; Mujtaba *et al.*, 2019; Madera-Santana *et al.*, 2019).

QUITOSANO COMO RECURBIMIENTO COMESTIBLE

El quitosano es un heteropolisacárido formado por unidades de N-acetyl-D-glucosamina mediante enlaces glicosídicos (β 1-4), que destaca por su biodegradabilidad, biocompatibilidad, funcionalidad, nula toxicidad, alta adherencia, propiedades antimicrobianas y capacidad para formar recubrimientos (Rinaudo, 2008; Bautista-Baños *et al.*, 2017; Jiao *et al.*, 2019; Mujtaba *et al.*, 2019). Es un biopolímero de naturaleza policiática debido a la presencia de grupos amino en su estructura, los cuales juegan un papel importante dentro de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del quitosano (Rinaudo, 2008; Berumen-Varela *et al.*, 2015; Bautista-Baños *et al.*, 2017). Se ha propuesto que las interacciones electrostáticas entre el grupo amino (que presenta alta densidad de carga) del quitosano con los grupos fosforilo presentes en los lípidos de membrana de los microorganismos son los principales responsables de la actividad antimicrobiana de este biopolímero (Bautista-Baños *et al.*, 2017). Además, este grupo funcional, junto con los grupos hidroxilo ($-OH$) presentes en la estructura del quitosano pueden actuar como sitios activos para la interacción y/o adsorción de compuestos orgánicos e inorgánicos (Mohandas, Deepthi, Biswas & Jayakumar, 2017).

El quitosano puede obtenerse a partir de fuentes naturales (exoesqueleto de crustáceos, paredes celulares de hongos y algas) por medios químicos y/o enzimáticos a través de la desacetilación de la quitina (Bautista-Baños *et al.*, 2017; Mujtaba *et al.*, 2019). De acuerdo con la eficiencia y naturaleza del método de obtención, este biopolímero puede presentar diferentes grados de desacetilación (GDA) y peso molecular, lo anterior asociado al porcentaje de oxidación del quitosano y a la severidad de los procesos de desproteinización y

desmineralización de cada método de obtención, además puede existir una despolarización parcial de la quitina y por consiguiente resultar en un quitosano con peso molecular bajo (López, Rivas, Loaiza & Sabino, 2010). El GDA del quitosano determina la cantidad de grupos aminos libres que posee (a mayor GDA, mayor cantidad de grupos amino libres), lo que influye en las propiedades tecnológicas y funcionales del recubrimiento (Chen, Wang, Lai & Lin, 2003; Rinaudo, 2008; Mujtaba *et al.*, 2019). Por ejemplo, la viscosidad de las soluciones del quitosano es influenciada por el GDA del biopolímero, como lo reportan Chen *et al.* (2003), que al utilizar quitosano con un GDA alto ($> 85\%$), la viscosidad de las soluciones formadoras de recubrimientos es baja (< 5 unidades de viscosidad rápida, UVR) en comparación con la obtenida al emplear quitosano con bajo ($50\% = 30$ UVR) y medio ($75\% = 15$ UVR) GDA, lo anterior, atribuido al incremento en la formación de puentes de hidrógeno con el medio, promovido por el incremento en las cargas positivas de los grupos amino del quitosano. En este contexto, se ha recomendado que para elaborar recubrimientos de quitosano uniformes y estables se empleen soluciones con baja viscosidad, debido a que una solución con una viscosidad alta es difícil de manejar y genera recubrimientos poco uniformes, con presencia de burbujas de aire, lo que afecta la calidad del mismo (Wu *et al.*, 2016).

Los recubrimientos a base de quitosano se pueden preparar a partir de la disolución del quitosano en medios acidificados (preferentemente ácidos orgánicos) (Bautista-Baños *et al.*, 2017) y se han empleado en la conservación de frutas y hortalizas debido a su actividad antifúngica (Berumen-Varela *et al.*, 2015; Fortunati *et al.*, 2017). Asimismo, el quitosano puede actuar como agente inductor de diferentes mecanismos de defensa del fruto (Romanazzi *et al.*, 2016; Gutiérrez-Martínez, Bautista-Baños, Berumen-Varela, Ramos-Guerrero & Hernández-Ibáñez, 2017). Berumen-Varela *et al.* (2015) mencionan que el quitosano aplicado en frutos de mango, tiene un efecto positivo sobre la expresión y actividad de la enzima peroxidasa, que reduce los daños asociados a la presencia de microorganismos patógenos. Además, el análisis del transcriptoma de la interacción aguacate–*Colletotrichum*–quitosano, demostró que el quitosano induce la expresión de genes relacionados en la biosíntesis de compuestos fenólicos y regula un gran número de procesos metabólicos, que previenen la proliferación del fitopatógeno (Xoca-Orozco *et al.*, 2017). Por su parte, Zhang, Wang, Hu and Liu (2015a) reportaron que la aplicación de quitosano al 0.2% en jitomate cherry induce la expresión de los genes MPK3, MPK6, PR1a1 y PR5, que le confiere al fruto resistencia en contra del moho gris causado por *Botrytis cinerea*, posiblemente asociado con la vía de señalización de la proteína quinasa activada por mitógeno (MAPK).

Factores como la viscosidad de la solución, temperatura de secado, modo de preparación, la concentración y tipo de ácido utilizado para su disolución, así como la concentración y el grado

de desacetilación del quitosano, pueden limitar la efectividad de los recubrimientos resultantes, principalmente en términos de actividad antimicrobiana, rigidez y permeabilidad de gases (Rinaudo, 2008; Bautista-Baños *et al.*, 2017; Jiao *et al.*, 2019). Una alternativa para mejorar el desempeño (propiedades tecnológicas y funcionales) del quitosano como recubrimiento, es su funcionalización mediante la incorporación de diversos componentes orgánicos, inorgánicos y/o biológicos dentro de la matriz polimérica (Hajji *et al.*, 2018; Kaewklin, Siripatrawan, Suwanagul & Lee, 2018; Jiao *et al.*, 2019; Wang, *et al.*, 2019).

FUNCIONALIZACIÓN DEL QUITOSANO PARA LA CONSERVACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS

La funcionalización se define como la modificación de las propiedades fisicoquímicas de cualquier material mediante la incorporación de otro (Bilalis, Katsigiannopoulos, Avgeropoulos & Sakellariou, 2014). En general, existen dos tipos de funcionalización, covalente y no covalente (Layek & Nandi, 2013). La funcionalización covalente, se basa en la unión mediante enlaces covalentes y por reacción directa de los grupos funcionales de los diversos componentes, lo que en la mayoría de los casos, modifica las propiedades intrínsecas del material funcionalizado, mientras que la funcionalización no covalente o supramolecular, se basa en la adsorción física del material funcionalizante en la red (puede ser en la superficie) del material funcionalizado mediante interacciones electrostáticas o hidrofóbicas, sin alterar las características intrínsecas del material funcionalizado (Bilalis *et al.*, 2014; Maccora *et al.*, 2019).

En la actualidad existe un creciente interés por el desarrollo de tecnologías y/o materiales que permitan incrementar la vida de anaquel de los productos hortofrutícolas (USDA, 2016). Por lo que, la funcionalización del quitosano mediante la adición de compuestos orgánicos (compuestos bioactivos, ácidos orgánicos, aceites esenciales), inorgánicos (TiO_2 , SiO_2 , Ag),

y microorganismos (levaduras y lactobacilos), además de la integración de otras biomoléculas como proteínas, polisacáridos y lípidos a la matriz polimérica mediante interacciones covalentes o no covalentes (Figura 1) puede ser una alternativa viable para mejorar las propiedades tecnológicas, funcionales y biológicas de este biopolímero (Rinaudo, 2008; Bautista-Baños *et al.*, 2017; Solano-Doblado *et al.*, 2018).

En la Tabla I se presentan algunos de los hallazgos más recientes relacionados con el uso de quitosano funcionalizado (RQF) con diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos, así como su aplicación y principales efectos sobre los parámetros de calidad (fisicoquímicos, fisiológicos y microbiológicos), atributos sensoriales y vida de anaquel de frutas y hortalizas.

FUNCIONALIZACIÓN CON ACEITES ESENCIALES

La incorporación de aceites esenciales de canela, naranja y limón a recubrimientos a base de quitosano ha demostrado ser efectiva para prolongar la vida de anaquel de fresas (7–15 días a 5 °C), pepinos (21 días a 10 °C), jujube (20 días a 4 °C), pimiento morrón (35 días a 8 °C) y mango (11 días a 4 °C) (Xing *et al.*, 2011a; Xing, Xu, Che, Li & Li, 2011b; Perdones, Sánchez-González & Vargas, 2012; Rico, Gutiérrez & Díaz-Moreno, 2012; López-Mata *et al.*, 2012; Mohammadi, Hashemi & Hosseini, 2015). En general, los frutos tratados con los recubrimientos funcionalizados con aceites esenciales disminuyen su tasa de respiración, mantienen su firmeza y calidad (pH, sólidos solubles totales, acidez titulable y color). Además, reducen la incidencia y aparición de signos de enfermedad causada por los hongos *B. cinerea* en fresa (Perdones *et al.*, 2012) y *Penicillium citrinum* en frutos de jujube (Xing *et al.*, 2011b) y por el oomiceto *Phytophthora drechsleri* en pepino (Mohammadi *et al.*, 2015), y les provee protección contra la proliferación de bacterias (reducción de coliformes, bacterias mesófilas aerobias y bacterias psicrófilas) durante su almacenamiento, en comparación con los frutos

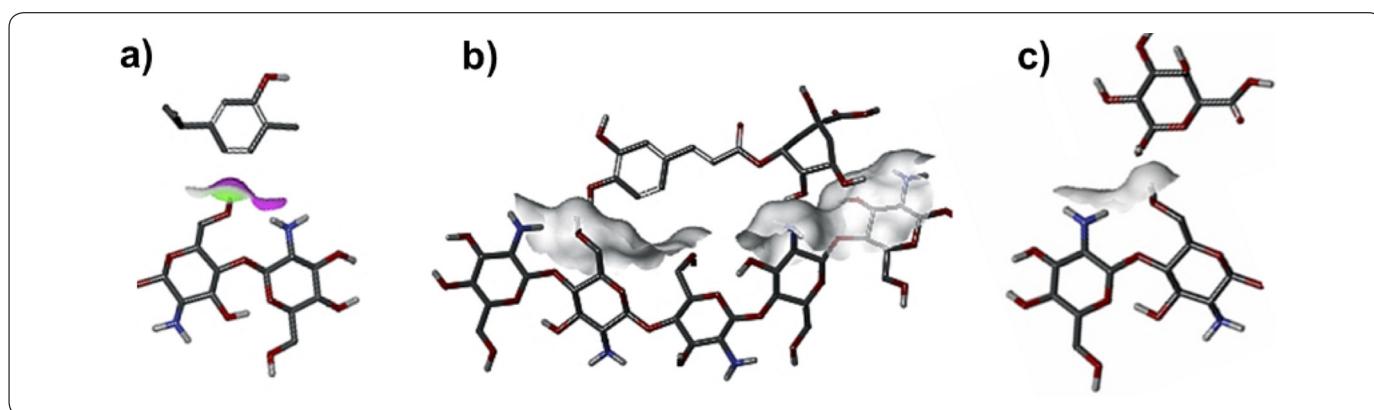


Figura 1. Posible interacción estructural del quitosano funcionalizado con a) carvacrol, b) ácido clorogénico y c) pectina.

Fuente: Elaboración propia. Estructuras tomadas de la base de datos PubChem, National Center for Biotechnology Information (quitosano ID: 71853, carvacrol ID: 10364, ácido clorogénico ID: 1794427, pectina: 441476) y modificadas con uso del software Discovery Studio Predictive Science Application (Dassault Systèmes BIOVIA®).

Tabla I. Funcionalización de recubrimientos de quitosano y su efecto en la vida de anaquel de frutas y hortalizas.

Fruto	*Composición del RQF	PM/ GDA del quitosano	Aplicación	Almacenamiento	**Observación	Vida de anaquel (días)	Referencia
Fresa	Q-2 %; EA-hoja de <i>Moringa oleifera</i> 1% 75 - 78 %	NI/ 75 - 78 %	Recubiertas de forma manual con brocha de repostería y secado con corriente de aire frío durante 10 min. con secadora manual	4 °C	Mejora índice de sabor (mayor dulzura), menor acidez.	10	Madera et al. (2019)
Melón	Q-1 %, AgNO ₃ : 0.375 %	NI/ ≤ 75 %	Inmersión durante 8 min y secado con aire forzado a 10 °C durante 2 h	5 °C con HR del 90 - 95 %	Reduce tasa de respiración, preserva atributos de calidad y sensoriales.	13	Ortiz-Duarte et al. (2019)
Durazno	Q-1 %, ácido clorogénico: 1% Q-0.5 %, <i>Cryptococcus laurentii</i> 1×10 ⁷ cels/mL	180 kDa/ 85 % NI/ 80 %	Inmersión durante 2 min y secado en condiciones ambiente en condiciones ambiente	20 °C con HR del 80 - 90 %	Retarda proceso de maduración, mayor firmeza.	8	Jiao et al. (2019)
Toronja			Inmersión durante 2 min y secado en condiciones ambiente	20 °C	Mantiene calidad en general, mayor concentración de CF.	28	Wang et al. (2019)
Mandarina	Q-1.5 %, montmorillonita: 1 % p/v	180 kDa/ 90 % NI/ ≥ 90 %	Inmersión durante 3 min y secado en condiciones ambiente en condiciones ambiente	10 °C con HR del 70 %	Menor tasa de descomposición, pérdida de peso y pérdida de sólidos solubles	11	Xu et al. (2018)
Albaricoque	Q-0.5 %, APS (50 g/L)	NI/ ≥ 90 %	Inmersión durante 3 min y secado en condiciones ambiente	2 °C con HR del 75 %	Mejora textura, reduce degradación de pectina.	42	Zhang et al. (2018)
Mandarina	Q-1 %, ξ -polilisina: 7 %	NI/ ≥ 90 %	Inmersión durante 1 min y secado en condiciones ambiente	10 °C con HR del 60 %	Preserva la calidad en general, retiene AA, menor incidencia de enfermedad.	25	Li et al. (2018)
Fresa	Q-2.4 %, carotenoproteínas: 0.005 %	6120 g mol ⁻¹ / 75 %	Inmersión durante 3 min y secado en condiciones ambiente durante 15 min	25 °C	Cambios mínimos en peso, pH y AT en comparación con el grupo control.	11	Hajji et al. (2018)
Jitomate	Q-1 %, nano-TiO ₂ : 1 % p/v	100 kg/ mol ⁻¹ / 85 %	Inmersión	20 °C con HR del 85 %	Retarda el proceso de maduración, mayor contenido de licopeno.	15	Kaewklai et al. (2018)
Lechuga	Q-0.1%, clorhidrato: 1 g/L	60 kDa/ 80 -90 %	Inmersión durante 30 s y secado en condiciones ambiente	4 °C con HR del 90 %	Reduce incidencia de moho gris.	7	Fortunati et al. (2017)
Kiwi	Q-0.1%, clorhidrato: 1 g/L	60 kDa/ 80 -90 %	Inmersión durante 30 s y secado en condiciones ambiente	4 °C con HR del 90 %	Reduce incidencia de moho gris.	20	Fortunati et al. (2017)
Nectarín	Q-1.5 %, alginato de sodio: 1 %	NI/ NI	Inmersión durante 2 min y secado en condiciones ambiente durante 30 min	4 °C	Efectos negativos en parámetros de calidad.	9	Chiabrandi & Giacalone (2016)

*La composición del recubrimiento de quitosano funcionalizado (RQF) es tomado como base el tratamiento que presentó los mejores resultados; **La observación es en comparación con los resultados obtenidos al comparar frutos recubiertos con quitosano o frutos sin recubrir. PM: Peso molecular (APM: alto peso molecular, MPM: medio peso molecular); GDA: Grado de desacetilación del quitosano; Q: Quitosano; β -CDT: β -Ciclodextrina; AA: Ácido ascórbico; APS: Aislado proteico de soya; EA: Extracto acuoso; TA: Temperatura ambiente; CF: Compuestos fenólicos; HR: Humedad relativa; NI: No se presenta información

Tabla I. Funcionalización de recubrimientos de quitosano y su efecto en la vida de anaquel de frutas y hortalizas.

Fruto	*Composición del RQF	PM/ GDA del quitosano	Aplicación	Almacenamiento	**Observación	Vida de anaquel (días)	Referencia
Fresa	Q-1 %, EA de <i>Paeonia rockii</i> : 125 µg/mL	100 kDa /95 %	Inmersión	4 °C	Extiende vida de anaquel sin alteración de atributos sensoriales.	16	Pagliarulo <i>et al.</i> (2016)
Plátano	Q-1.5 %, PLS: 3 %	NI/ 96 %	Inmersión durante 1 min y secado en condiciones ambiente durante 90 min	25 °C con HR del 75 %	Prolonga aparición de pico climático, menor tasa de respiración.	14	Arce-Ortiz <i>et al.</i> (2016)
Guayaba	Q-3.0 %, estearina de palma a 4 % v/v	APM/ NI	Inmersión durante 15 s y secado en condiciones ambiente	5 °C con HR del 80 – 85 %	Mitiga daños por frío, retiene mayor firmeza, reducción en emisión de CO ₂ .	31	Nurul-Hanani <i>et al.</i> (2016)
Pepino	Q-0.5 %, ácido salicílico: 0.1 %	NI/ ≥ 90 %	Inmersión durante 5 min y secado con un ventilador	2 °C con HR del 90 %	Mitiga daños por frío, previene oxidación de AA y clorofila.	12	Zhang <i>et al.</i> (2015b)
Pepino	Q-0.3 %, aceite esencial de canela 0.25 %	MPM /75 – 85 %	Inmersión durante 2 min y secado en condiciones ambiente	10 °C con HR del 90 – 95 %	Extiende vida de anaquel, estabilidad microbiológica.	21	Mohammadi <i>et al.</i> (2015)
Fresa	Q-2 %, proteína de quinoa: 18 %, aceite de girasol: 2.9 %	NI/NI	Inmersión durante 1 min y secado en estufa con aire forzado durante toda la noche	0 °C con HR del 90 %	Reducción en emisión de CO ₂ , mantenimiento de calidad sensorial.	15	Valenzuela <i>et al.</i> (2015)
Arándano	Q-2 %, EA-hoja de arándano (8 %)	NI/ ≥ 90 %	Inmersión durante 15 s y secado en condiciones ambiente durante 30 min	2 °C con HR del 95 %	Retrasa maduración, mayor retención de CF y mayor capacidad antioxidante.	35	Yang <i>et al.</i> (2014)
Mora azul	Q-1 %, carvacrol: 0.05 % p/v	310 kDa/ 75 – 85 %	Inmersión durante 30 s y secado en condiciones ambiente durante 2 h	10 °C	Reducción de la cuenta viable de bacterias y hongos, mantiene firmeza del fruto.	7	Sun <i>et al.</i> (2014)
Ciruelas	Q-1%, AA: 40 mM/L	NI/ NI	Inmersión durante 15 min y secado en condiciones ambiente	5 °C con HR del 90 – 95 %	Preserva calidad en general, incremento en enzimas antioxidantes.	20	Liu <i>et al.</i> (2014)
Uva roja	Q-1 %, β-CDT: 1 %	NI/ 85 %	Inmersión durante 3 min y secado con un ventilador	4 °C con HR del 90 %	Incrementa enzimas antioxidantes.	13	Youwei & Yinzie (2013)
Longan	Q-2 %, nano-SiO ₂ : 0.5 %	APM-375 kDa/ 76 %	Inmersión durante 4 min y secado en condiciones ambiente	25 °C con HR del 70 – 80 %	Reduce actividad de enzima polifenol oxidasa.	8	Shi <i>et al.</i> (2013)
Fresa	Q-1 %, CMC 1 % p/v	APM /82.7 %	Inmersión durante 2 min y secado en estufa a 26 °C durante 2 h	11 °C con HR del 70 – 75 %	Mantiene calidad en general, mayor concentración de CF y antocianinas	12	Gol <i>et al.</i> (2013)

*La composición del recubrimiento de quitosano funcionalizado (RQF) es tomada como base el tratamiento que presentó los mejores resultados; **La observación es en comparación con los resultados obtenidos al comparar frutos recubiertos con quitosano o frutos sin recubrir. **PM:** Peso molecular (**APM:** alto peso molecular, **MPM:** medio peso molecular); **GDA:** Grado de desacetilación del quitosano; **Q:** Quitosano; **β-CDT:** β-Ciclodextrina; **AA:** Ácido ascórbico; **APS:** Aislado proteico de soya; **EA:** Extracto acoso; **TA:** Temperatura ambiente; **CF:** Compuestos fenólicos; **HR:** Humedad relativa; **NI:** No se presenta información

Tabla I. Funcionalización de recubrimientos de quitosano y su efecto en la vida de anaquel de frutas y hortalizas.

Fruto	*Composición del RQF	PM/ GDA del quitosano	Aplicación	Almacenamiento	**Observación	Vida de anaquel (días)	Referencia
Fresa	Q-1 %, aceite esencial de limón: 3 % p/v	APM/ 75.6%	Inmersión durante 1 min y secado en condiciones ambiente durante 1 h	5 °C con HR del 90 %	Preserva calidad en general, menor incidencia de moho gris, la presencia de AE de limón altera el aroma de la fresa	7	Perdones et al. (2012)
Fresa	Q-2 %, aceite esencial de canela: 0.1 % p/v	128 kDa /66 %	Inmersión durante 90 s y secado con aire caliente para eliminar exceso de la solución	5 °C	Reducción en crecimiento bacteriano, mayor vida de anaquel	14	López-Mata et al. (2012)
Jujube	Q-1 %, nano-SiO ₂ ; 0.04 %	200 kDa/ 85 %	Inmersión durante 3 min y secado con un ventilador	temperatura ambiente con HR del 85 %	Retrasa senescencia, incrementa enzimas antioxidantes, mayor contenido de flavonoides.	32	Yu et al. (2012)
Carambola	Q-1 %, estearina de palma relación molar 1:1	NI/ 85 %	Inmersión durante 15 s y secado en condiciones ambiente	28 °C	Retrasa proceso de maduración, mantiene firmeza.	20	Nurul-Hanami et al. (2012)
Mango	Q-1 %, pectina: 0.2% multicapa	NI/ NI	Inmersión durante 15 min, repitiendo el proceso 5 veces para obtener multicapas con secado en condiciones ambiente	4 °C con HR del 93 %	Mejora parámetros de calidad.	45	Medeiros et al. (2012)
Mango (cubos)	Q-2 %, aceite esencial de naranja y limón: 1 % v/v	NI/NI	Inmersión durante 10 min y secado en condiciones durante 1 h	4 °C	Reducción en la cuarenta viable de coliformes, psicrófilos, mohos y levaduras.	12	Rico et al. (2012)
Fresa	Q-1 %, almidón de yuca: 2 %	NI/ 98 %	Inmersión durante 1 min y secado en condiciones ambiente durante 3 h	10 °C	Mejor apariencia y mayor retención AA.	9	Campos et al. (2011)
Pimiento morrón	Q-1 %, aceite esencial de canela: 0.25%	NI/ ≥ 95 %	Inmersión durante 5 min y secado con ventilador durante 50 min	8 °C con HR del 95 %	Mayor contenido de AA y clorofila, mejora atributos sensoriales.	35	Xing et al. (2011a)
Jujube	Q-1 %, aceite esencial de canela: 0.75 % v/v	NI/ ≥ 95 %	Inmersión y secado en condiciones ambiente	4 °C con HR del 90 - 95 %	Reduce actividad de la enzima polifenol oxidasa, retiene contenido de AA Y CF.	20	Xing et al. (2011b)
Lichi	Q-1 %, AA: 40 mmol/L	NI/NI	Inmersión durante 15 min y secado en condiciones ambiente	5 °C con HR del 90 %	Reduce actividad de la enzima polifenol oxidasa, incrementa enzimas antioxidantes.	30	Sun et al. (2010)
Uva	Q-1 %, EA de semilla de uva: 0.1 %	NI/NI	Inmersión durante 1 min y secado en condiciones ambiente durante 1 h	15 °C	Mantiene calidad general, reduce incidencia de moho gris.	7	Xu et al. (2007)
Mango	Q-0.5 %, <i>Candida</i> sp. 40 µL (1.5 × 10 ⁶ UFC/mL)	NI/NI	Inmersión durante 5 min y secado en condiciones ambiente	25 °C con HR del 95 %	Reduce signos de antracnosis hasta un 94 %	7	Chantarasri et al. (2007)

*La composición del recubrimiento de quitosano funcionalizado (RQF) es tomada como base el tratamiento que presentó los mejores resultados; **La observación es en comparación con los resultados obtenidos al comparar frutos recubiertos con quitosano o frutos sin recubrir. **PM:** Peso molecular (**APM:** alto peso molecular, **MPM:** medio peso molecular); **GDA:** Grado de desacetilación del quitosano; **Q:** Quitosano; **β-CDT:** β-Cielodextrina; **AA:** Ácido ascórbico; **APS:** Aislado proteico de soya; **EA:** Extracto acoso; **TA:** Temperatura ambiente; **CF:** Compuestos fenólicos; **HR:** Humedad relativa; **NI:** No se presenta información

sin recubrir y/o recubiertos con quitosano sin funcionalizar (Rico *et al.*, 2012). La baja incidencia de enfermedades en los frutos tratados se asocia directamente al control del patógeno causante de la misma por efecto aditivo o sinérgico entre el quitosano y los aceites esenciales (Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2017; Rodríguez-Guzmán *et al.*, 2019). La incorporación de aceites esenciales a la matriz del quitosano mejoró significativamente las propiedades de barrera y de intercambio de gases (disminución en la permeabilidad de vapor de agua) (Perdones *et al.*, 2012), lo anterior, atribuido a la naturaleza lipofílica de los aceites esenciales y al incremento del carácter hidrofóbico del recubrimiento, que eventualmente contribuye a retardar la maduración y deshidratación del fruto (Rinaudo, 2008; Mohammadi *et al.*, 2015) sin detrimiento en sus atributos sensoriales (sabor, color, apariencia, textura). Únicamente, se han reportado cambios en el sabor de fresas tratadas con el recubrimiento funcionalizado con aceite esencial de limón (Perdones *et al.*, 2012). Adicionalmente, los frutos (pimiento morrón y jujube) recubiertos con quitosano funcionalizado con aceite esencial de canela presentaron una mayor retención de ácido ascórbico, compuestos fenólicos, flavonoides y clorofila en comparación con los frutos sin recubrir o recubiertos con quitosano sin funcionalizar (Xing *et al.*, 2011a, Xing *et al.* 2011b), estos efectos pueden estar asociados principalmente a una reducción de la difusión del oxígeno entre el fruto y el recubrimiento, lo que ayuda a prevenir la oxidación de estos compuestos (USDA, 2016). El monoterpeno carvacrol, presente en el aceite esencial de algunas especies vegetales como orégano y tomillo (Robledo, Pierini, Díaz-Nieto, Fernández & Zon, 2019) ha sido utilizado para la funcionalización del quitosano y la conservación de la mora azul (7 días a 4 °C) con resultados positivos en mantener la calidad del fruto, similares a los ya descritos previamente (Sun, Narciso, Wang, Ference, Bai & Zhou, 2014). Sin embargo, este tipo de aceite puede presentar efectos fitotóxicos, citotóxicos y genotóxicos a concentraciones entre 0.375 y 3 mmol/L (de Assis-Alves *et al.*, 2018), por lo que, resulta necesario evaluar la toxicidad potencial del sistema quitosano–carvacrol, cuando este compuesto se utilice como agente funcionalizante de recubrimientos de quitosano para la conservación de alimentos. Por otro lado, no todos los aceites esenciales con los que se puede funcionalizar el quitosano, brindan efectos positivos para la conservación de frutos. Por ejemplo, la funcionalización con aceite esencial de tomillo (0.1% p/v) y clavo (0.2 % v/v), no mostró ventajas sobre el control de *Rizopodus stolonifer* y *Penicillium digitatum* cuando se aplicó a jitomate y mandarina, respectivamente (Ramos-García *et al.*, 2012; Shao *et al.*, 2015).

Se ha reportado que la actividad antimicrobiana de los recubrimientos de quitosano funcionalizados se debe en gran medida a los grupos aminos libres del quitosano y a los enlaces formados con el aceite esencial, lo que permite al recubrimiento establecer interacciones electrostáticas con la pared externa del microorganismo, lo que resulta en interferencias sobre la

síntesis de componentes esenciales para la célula, ya que el quitosano puede actuar como un agente quelante mediante la adsorción de iones metálicos esenciales para las reacciones enzimáticas, además de afectar directamente la estabilidad y permeabilidad (salida de K⁺ y entrada de Ca⁺) de la pared celular, lo que finalmente resulta en la inactivación o muerte de los microorganismos (Bosquez-Molina, Ronquillo-de-Jesús, Bautista-Baños, Verde-Calvo & Morales-López, 2010; Yuan *et al.*, 2016; Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2017; Ramos-Guerrero *et al.*, 2018). Ramos-García *et al.* (2012) informaron que la combinación de quitosano con aceite esencial de lima y cera de abeja aplicado en jitomate afectó el desarrollo normal de *R. stolonifer*, mediante la alteración de las estructuras reproductivas del hongo, así como daño sobre el micelio e hifas del mismo. Yuan, Chen & Li (2016) sugieren que el efecto antibacteriano de los recubrimientos de quitosano funcionalizado con aceites esenciales contra microorganismos aerobios, pudiera incrementarse debido al bajo contenido de oxígeno entre el fruto y el recubrimiento.

Es importante resaltar que la efectividad de este tipo de recubrimientos sobre el control de los microorganismos estará en función de la pureza, grado de desacetilación y fuente de obtención del quitosano, además de la susceptibilidad de los microorganismos que se deseé controlar, así como de la relación quitosano: aceite esencial, velocidad de liberación y disponibilidad de los aceites (Yuan *et al.*, 2016; Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2017).

FUNCIONALIZACIÓN CON EXTRACTOS NATURALES, ÁCIDO ASCÓRBICO Y ÁCIDO CLOROGÉNICO

Los recubrimientos de quitosano también han sido funcionalizados con extractos acuoso–orgánicos de diferentes especies vegetales, como son *Moringa oleifera*, flores de *Paeonia rockii*, hojas de arándano y semillas de uva para la conservación de las fresas (16 días a 4 °C), arándanos (35 días a 2 °C) y uva roja (28 días a 0–1 °C), respectivamente (Xu *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2014; Pagliarulo *et al.*, 2016; Madera-Santana *et al.*, 2019). Algunas ventajas particulares han sido reportadas para cada uno de estos recubrimientos. Por ejemplo, los frutos tratados con recubrimientos funcionalizados con extracto de flores de *Paeonia rockii* y hojas de arándano exhibieron cambios mínimos sobre su calidad en general, así como mayor retención de ácido ascórbico y compuestos fenólicos en comparación con los frutos recubiertos con quitosano sin funcionalizar (Yang *et al.*, 2014; Pagliarulo *et al.*, 2016), lo anterior, sin modificar los atributos sensoriales de los frutos tratados (Xu *et al.*, 2007; Pagliarulo *et al.*, 2016). Por su parte, la aplicación de un recubrimiento de quitosano funcionalizado con extracto de *Moringa oleifera* mejora el índice de sabor y dulzura de las fresas, pero no los parámetros de calidad en comparación con el grupo control (Madera-Santana *et al.*, 2019). En general, la composición de los extractos naturales que se agregan al quitosano, están fuertemente representados

por compuestos con capacidad antioxidante demostrada (ácido ascórbico, compuestos fenólicos y flavonoides). Estos antioxidantes pueden reducir el ataque de microorganismos, disminuir reacciones de oscurecimiento en la cáscara de los frutos y disminuir el estrés oxidativo sobre todo en frutos precortados. Asimismo, su combinación con el quitosano puede cambiar la estructura del recubrimiento y reducir la entrada del oxígeno disminuyendo la tasa de respiración y producción de etileno, todo eso conlleva a retardar la maduración del fruto (Torres-Aguirre *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2016). Adicionalmente, se ha reportado que el quitosano puede exhibir actividad antioxidante debido a la presencia de los grupos amino libres, sin embargo, este efecto depende directamente de la concentración, peso molecular y grado de desacetilación del biopolímero (Kim & Thomas, 2007).

Liu, Yuan, Chen, Li & Liu (2014) demostraron que la aplicación del recubrimiento de quitosano con ácido ascórbico tuvo un efecto positivo sobre la firmeza y color de los frutos de ciruela durante 20 días a 5 °C, además de una disminución en la tasa de respiración en comparación con los frutos tratados individualmente con los mismos componentes. La retención de la firmeza fue asociada al decremento en las actividades enzimáticas de las enzimas pectin metil esterasa y poligalacturonasa. Por su parte, Sun, Liang, Xie, Lei and Mo (2010) reportaron una disminución en la actividad enzimática de la polifenol oxidasa y peroxidasa en frutos de lichi recubiertos con quitosano funcionalizado y ácido ascórbico, lo que ayudó a conservar la calidad del fruto durante su almacenamiento (30 días a 4 °C).

Por su parte, Jiao *et al.* (2019) evaluaron el efecto de la incorporación de ácido clorogénico en una matriz de quitosano y su efecto sobre la vida de anaquel en duraznos. Los autores reportaron que los parámetros de calidad (pérdida de peso, retraso de senescencia y tasa de respiración, sólidos solubles totales, acidez titulable, pH, retención de firmeza y ácido ascórbico) del fruto recubierto se mantuvieron adecuados durante 8 días a 20 °C. Estos efectos fueron atribuidos al efecto sinérgico entre el ácido clorogénico y el quitosano, así como a la disminución en la difusión de oxígeno entre el fruto y el recubrimiento.

FUNCIONALIZACIÓN CON COMPUESTOS DE ORIGEN PROTEICO

Recientemente, diversos extractos proteicos (soya, quínoa, lactosuero y carotenoproteínas) han sido aprovechados para funcionalizar al quitosano mediante la incorporación y homogenización de ambos componentes (Maccora *et al.*, 2019), con el objetivo de prolongar la vida de anaquel del albaricoque (42 días a 4 °C), fresas (9–11 días a 4 °C) y plátanos (9 días a temperatura ambiente) (Valenzuela *et al.*, 2015; Arce-Ortiz, Ortega-Villalba, Ochoa-Martínez & Vélez-Pasos, 2016; Zhang, Chen, Lai, Wang & Yang, 2018; Hajji *et al.*, 2018). Los frutos tratados con los recubrimientos de

quitosano con aislado de proteína de soya (albaricoque), quínoa y carotenoproteínas (fresas) mantuvieron estables los parámetros de calidad, principalmente la textura. Los efectos observados en albaricoque, se atribuyen a la inhibición de la degradación de la pectina presente en la pared celular del fruto (Zhang *et al.*, 2018), mientras que los efectos observados en las fresas se asocian a la disminución en la emisión de CO₂, que fue menor en comparación con frutos recubiertos sólo con quitosano (Hajji *et al.*, 2018; Valenzuela *et al.*, 2015). Adicionalmente, el uso de un recubrimiento funcionalizado con proteína de lacto suero retrasó (2 días) la aparición del pico climatérico en plátano en comparación con el fruto control (Arce *et al.*, 2016). Di Pierro *et al.* (2006) mencionan que al funcionalizar el quitosano con matrices proteicas puede existir un mayor entrecruzamiento en la matriz, lo que mejora las propiedades mecánicas (esfuerzo a la tensión de 26.2 MPa) y de barrera (permeabilidad al oxígeno, CO₂ y vapor de agua de 7.8, 8.3 y 0.88 cm³ µm/m² día kPa, respectivamente) del recubrimiento resultante, en comparación con el recubrimiento de quitosano sin funcionalizar (esfuerzo a la tensión de 14.4 MPa, permeabilidad al oxígeno, CO₂ y vapor de agua de 20.6, 20.7 y 3.24 cm³ µm/m² día kPa, respectivamente). Es importante señalar que los resultados asociados al uso de aislados proteicos para funcionalizar quitosano, pueden optimizarse mediante cambios en las proporciones de cada componente del recubrimiento funcionalizado (Hajji *et al.*, 2018).

FUNCIONALIZACIÓN CON POLISACÁRIDOS

Una alternativa viable para la funcionalización del quitosano es la adición de otros polisacáridos como la pectina, carboximetilcelulosa y almidón de yuca (Campos, Kwiatkowski & Clemente, 2011; Medeiros, Pinheiro, Carneiro-da-Cunha & Vicente, 2012; Gol *et al.* 2013), con lo que se mejoran las propiedades de barrera del recubrimiento (reducción en la permeabilidad de oxígeno y vapor de agua) y extiende la vida de anaquel de frutas y hortalizas con cambios mínimos en los parámetros de calidad (baja pérdida de peso con cambios mínimos en pH, acidez titulable y sólidos solubles totales), mayor retención de ácido ascórbico, compuestos fenólicos y antocianinas, además de mejorar su apariencia y brindarles protección antimicrobiana (Campos *et al.*, 2011; Medeiros *et al.*, 2012; Gol *et al.*, 2013). Por otro lado, se han reportado efectos negativos sobre la calidad de los nectarines (4 °C, 95% HR, 9 días) al aplicar un recubrimiento de quitosano combinado con alginato de sodio, lo anterior, debido principalmente a la alta solubilidad y permeabilidad del vapor de agua del alginato de sodio, lo que rompe el equilibrio de la “atmósfera modificada” creada entre el fruto y el recubrimiento (Chiabrando & Giacalone, 2016). Aunque la funcionalización del quitosano con otros polisacáridos es una opción viable, deben considerarse factores como la solubilidad y estabilidad del biopolímero funcionalizante para obtener mejores resultados (Bautista-Baños *et al.*, 2017; Rinaudo, 2014).

FUNCIONALIZACIÓN CON AGENTES BIOLÓGICOS

La funcionalización del quitosano con agentes biológicos, principalmente levaduras y lactobacilos, es otra alternativa prometedora para minimizar las pérdidas postcosecha de frutas y hortalizas (Rojas-Grau, Soliva-Fortuny & Martín-Belloso, 2009). Chantrasri, Sardsud, Sangchote and Sardsud (2007) reportaron que la incorporación de *Candida* sp. al recubrimiento a base de quitosano minimizó la incidencia de antracnosis (hasta 94 %) causada por *C. gloeosporioides* en mango (7 días a 25 °C). De manera similar, Wang *et al.* (2019) reportaron que la funcionalización del quitosano con *Cryptococcus laurentii* redujo la incidencia del moho azul causado por *P. italicum* en frutos de uva (8 días a 20 °C). Además, a la matriz formada con quitosano y un agente biológico se le puede incorporar compuestos previamente encapsulados, como el ácido ascórbico, compuestos fenólicos y aceites esenciales que se liberan gradualmente bajo condiciones específicas, con el objetivo de mejorar las propiedades tecnológicas (mecánicas, fisicoquímicas, térmicas y de barrera) y funcionales (actividad antimicrobiana y antioxidante) del recubrimiento resultante (Yin *et al.*, 2019). Sin embargo, aún se requieren más estudios para encontrar las condiciones adecuadas que permitan incrementar la vida de anaquel de los frutos tratados con este tipo de recubrimiento, sin afectar los atributos de calidad de los mismos, además de garantizar la viabilidad de los microorganismos empleados durante la funcionalización (Castillo-Escandón, Fernández-Michel, Cueto-Wong & Montfort, 2019).

FUNCIONALIZACIÓN CON COMPUESTOS INORGÁNICOS

Compuestos inorgánicos como el dióxido de silicio (Yu *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2013) y titanio (Kaewklin *et al.*, 2018), montmorillonita (Xu, Qin & Ren, 2018) y plata (Ortiz-Duarte, Pérez-Cabrera, Artés-Hernández & Martínez-Hernández, 2019) se han utilizado para la funcionalización del quitosano con el objetivo de prolongar la vida de anaquel del fruto de jujube (32 días a temperatura ambiente), longan (8 días a temperatura ambiente), jitomate (15 días a 20 °C), mandarina (11 días a 10 °C) y melón (13 días a 5 °C), respectivamente; con modificaciones mínimas sobre parámetros de calidad y atributos sensoriales de los frutos en comparación con los controles recubiertos con quitosano sin funcionalizar. Se ha reportado además, que el recubrimiento de quitosano funcionalizado con TiO₂ tiene la capacidad de degradar el etileno en presencia de luz UV (320–390 nm durante 180 min), debido a que el TiO₂ tiene la capacidad de generar radicales •OH y especies reactivas de oxígeno en presencia de luz UV, los cuales a su vez pueden reaccionar con moléculas orgánicas como el etileno y descomponerlo en CO₂ y agua, lo que ayuda a retardar el proceso de maduración de los frutos de jitomate (Kaewklin *et al.*, 2018).

FUNCIONALIZACIÓN CON OTROS COMPUESTOS

Se ha reportado que la funcionalización del quitosano con β-ciclodextrina extiende la vida de anaquel de uvas rojas

(12 días a 4 °C) (Youwei & Yinzhe, 2013), mientras que, la funcionalización con clorhidrato prolonga la vida de anaquel de la lechuga (7 días) y kiwi (20 a 25 días, 4 °C), con una disminución en la incidencia del moho gris causado por *B. cinerea* y *Pectobacterium carotovorum*, respectivamente (Fortunati *et al.*, 2017). De igual manera, Li, Ye, Hou & Zhang (2018) lograron extender la vida de anaquel (25 días a 10 °C) de frutos de mandarina tratados con un recubrimiento funcionalizado con ξ-polilisina, sin cambios en sus atributos de calidad y mayor retención de ácido ascórbico. Por su parte, la funcionalización con estearina de palma ha sido efectiva para prolongar la vida de anaquel de los frutos de carambola (20 días a temperatura ambiente) asociado a la reducción en la tasa de respiración y producción de etileno (Nurul-Hanani, Halimahton-Zahrah & Zaibunnisa, 2012). Resultados similares se reportaron al aplicar este tipo de recubrimiento (quitosano–estearina de palma) en guayaba (31 días a 5 °C), además de una disminución en el daño por frío y pérdida de peso en comparación con los frutos recubiertos sólo con quitosano o frutos sin recubrir (Nurul-Hanani, Halimahton-Zahrah & Zaibunnisa, 2016). Finalmente, la funcionalización con ácido salicílico ha sido efectiva para minimizar el daño por frío (12 días a 2 °C) y pérdida de peso (< 3 %) en pepino, además de favorecer la retención de ácido ascórbico y clorofila (Zhang *et al.*, 2015b). Estos efectos se deben a que el ácido salicílico actúa como agente inductor para la activación del sistema de defensa del fruto, entre ellos la síntesis de proteínas de choque térmico, las cuales son proteínas que protegen a otras proteínas presentes en la membrana de la célula y evitan su desnaturización, lo que retarda el deterioro de la membrana celular y pérdida de agua (Rasouli, Saba & Ramezanian, 2019).

CONCLUSIONES

La funcionalización de recubrimientos comestibles mediante la incorporación de diversos compuestos es una alternativa viable para mejorar las propiedades tecnológicas y funcionales de los recubrimientos comestibles convencionales. El uso de recubrimientos a base de quitosano funcionalizado puede prevenir o minimizar la incidencia de enfermedades postcosecha, además de retrasar el deterioro natural de varios productos hortofrutícolas, conservar su calidad y aumentar su vida útil. Sin embargo, se requieren más estudios para mejorar las condiciones de obtención y aplicación de este tipo de recubrimientos comestibles en frutas y hortalizas, además de complementar la caracterización de sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y térmicas que pudieran condicionar el desempeño de los mismos tanto *in vitro* como *in vivo*.

AGRADECIMIENTOS

Anaya-Esparza Luis M. agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (702634) para estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Arce-Ortiz, K. L., Ortega-Villalba, K. J., Ochoa-Martínez, C. I. & Vélez-Pasos, C. (2016). Evaluation of the water vapor permeability for whey protein/chitosan films and its effect on respiration of coated banana. *INNOTECH*, **11**(1), 59–64.
- Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Correa-Pacheco, Z. & Corona-Rangel, M. L. (2017). Chitosan: a versatile antimicrobial polysaccharide for fruit and vegetables in postharvest—a review. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, **23**(2), 103–121. DOI: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.11.030>
- Berumen-Varela, G., Coronado Partida, L. D., Ochoa Jiménez, V. A., Chacón López, M. A. & Gutiérrez Martínez, P. (2015). Effect of chitosan on the induction of disease resistance against *Colletotrichum* sp. in mango (*Mangifera indica L.*) cv. Tommy Atkins. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, **66**(1), 16–21.
- Bilalis, P., Katsigiannopoulos, D., Avgeropoulos, A. & Sakellariou, G. (2014). Non-covalent functionalization of carbon nanotubes with polymers. *RCS Advances*, **4**, 2911–2934. DOI: 10.1039/C3RA44906H
- Bosquez-Molina, E., Ronquillo-de Jesús, E., Bautista-Baños, S., Verde-Calvo, J. R. & Morales-López, J. (2010). Evaluation of the inhibitory effect of essential oils against *Colletotrichum gloesporioides* and *Rhizopus stolonifer* in stored papaya fruit and their possible application in coatings. *Postharvest Biology and Technology*, **57**, 132–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.03.008>
- Campos, R. P., Kwiatkowski, A. & Clemente, E. (2011). Post-harvest conservation of organic strawberries coated with cassava starch and chitosan. *Revista Ceres*, **58**(5), 554–560. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2011000500004>
- Castillo-Escandón, V., Fernández-Michel, S. G., Cueto-Wong, M. C. & Montfort, G. R. C. (2019). Criterios y estrategias tecnológicas para la incorporación y supervivencia de probióticos en frutas, cereales y sus derivados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, **22**(1), 1–17. DOI: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.173>
- Chantrasri, P., Sardsud, V., Sangchote, S. & Sardsud, U. (2007). Combining yeasts and chitosan treatment to reduce anthracnose fruit rot in mangoes. *Asian Journal of Biology Education*, **3**(1), 40–46.
- Chen, Y. C., Wang, C. H., Lai, L. S. & Lin, K. W. (2003). Rheological properties of chitosan and its interaction with porcine myofibrillar proteins as influenced by chitosan's degree of deacetylation and concentration. *Journal of Food Science: Food Chemistry and Toxicology*, **68**(3), 826–831. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb08250.x>
- Chiabrando, V. & Giacalone, G. (2016). Effect of chitosan and sodium alginate edible coatings on the postharvest quality of fresh-cut nectarines during storage. *Fruits*, **71**(2), 79–85. DOI: 10.1051/fruits/2015049
- de Assis-Alves, T., Fontes-Pinheiro, P., Praca-Fontes, M. M., Andrade-Vieira, L. F., Barelo-Correa, K., de Assis-Alves, T., Aparecida da Cruz, F., Lacerda-Junior, V., Ferreira, A. & Bastos-Soares, T. C. (2018). Toxicity of thymol, carvacrol and their respective phenoxyacetic acids in *Lactuca sativa* and *Sorghum bicolor*. *Industrial Crops and Products*, **114**, 59–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.071>
- Di Pierro, P., Chico, B., Villalonga, R., Marinello, L., Damiao, A. E., Masi, P. & Pota, R. (2006). Chitosan-whey protein edible films produced in the absence or presence of transglutaminase: Analysis of their mechanical and barrier properties. *Biomacromolecules*, **7**(1), 744–749. DOI: 10.1021/bm050661u
- Fortunati, E., Giovanale, G., Luzi, F., Mazzaglia, A., Kenny, J. M., Torre, L. & Balestra, G. M. (2017). Effective postharvest preservation of kiwifruit and romaine lettuce with a chitosan hydrochloride coating. *Coatings*, **7**, 2–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings7110196>
- Gol, N. B., Patel, P. R. & Ramana-Rao, T. V. (2013). Improvement of quality and shelf-life of strawberries with edible coatings enriched with chitosan. *Postharvest Biology and Technology*, **85**(1), 185–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.008>
- Gutiérrez-Martínez, P., Bautista-Baños, S., Berúmen-Varela, G., Ramos-Guerrero, A. & Hernández-Ibáñez, A. M. (2017). *In vitro* response of *Colletotrichum* to chitosan. *In vitro* response of *Colletotrichum* to chitosan. Effect on incidence and quality on tropical fruit. Enzymatic expression in mango. *Acta Agronomica*, **66**(2), 282–289. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v66n2.53770>
- Hajji, S., Younes, I., Affes, S., Boufi, S. & Nasri, M. (2018). Optimization of the formulation of chitosan edible coatings supplemented with carotenoproteins and their use for extending strawberries postharvest life. *Food Hydrocolloids*, **83**(1), 375–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.013>
- Jiao, W., Shu, C., Li, X., Cao, J., Fan, X. & Jiang, W. (2019). Preparation of a chitosan-chlorogenic acid conjugate and its application as edible coating in postharvest preservation of peach fruit. *Postharvest Biology and Technology*, **154**(1), 129–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.05.003>
- Kaewklin, P., Siripatrawan, U., Suwanagul, A. & Lee, Y.S. (2018). Active packaging from chitosan-titanium dioxide nanocomposite film for prolonging storage life of tomato fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, **112**(1), 523–529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.124>
- Kim, K. W. & Thomas, R. L. (2007). Antioxidative activity of chitosan with varying molecular weights. *Food Chemistry*, **101**, 308–313. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.01.038
- Layek, R. K. & Nandi, A. K. (2013). A review on synthesis and properties of polymer functionalized graphene.

- Polymer*, **54**, 5087–5103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.06.027>
- Li, N. Y., Ye, Q. Q., Hou, W. F. & Zhang, G. Q. (2018). Development of antibacterial ϵ -polylysine/chitosan hybrid films and the effect on citrus. *International Journal of Biological Macromolecules*, **118**, 2051–2056. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2018.07.074](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.074)
- Liu, K., Yuan, C., Chen, Y., Li, H. & Liu, J. (2014). Combined effects of ascorbic acid and chitosan on the quality maintenance and shelf life of plums. *Scientia Horticulturae*, **176**, 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.06.027>
- López, A., Rivas, J., Loaiza, M. & Sabino, M. (2010). Degradación de películas plastificadas de quitosano obtenidas a partir de conchas de camarón. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, **25**, 133–143.
- López-Mata, M. A., Ruiz-Cruz, S., Navarro-Preciado, C., Ornelas-Paz, J. J., Estrada-Alvarado, M. I. & Gassos-Ortega, L. E. (2012). Effect of chitosan edible coatings in the microbial reduction and conservation of the quality of strawberries. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, **14(1)**, 33–43.
- Maccora, D., Dini, V., Battocchio, C., Fratoddi, I., Cartoni, A., Rotili, D., Castagnola, M., Faccini, R., Bruno, I., Scotognella, T., Giordano, A. & Venditti, I. (2019). Gold nanoparticles and nanorods in nuclear medicine: A mini review. *Applied Sciences*, **9**, 3232. DOI: [10.3390/app9163232](https://doi.org/10.3390/app9163232)
- Madera-Santana, J. T., De Dios-Aguilar, M. A., Colín-Chávez, C., Mariscal-Amaro, L. A., Nuñez-Colín, C. A., Veloz-García, R., Gimán-Maldonado, S. H., Peña-Caballero, V., Grijalva-Verdugo, C. P. & Rodríguez-Núñez, J. R. (2019). Coating based on chitosan and aqueous extract of *Moringa oleifera* leaf obtained by UMAE and its effect on the physicochemical properties of strawberry (*Fragaria x ananassa*). *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, **21(2)**, 155–163.
- Medeiros, B. G. S., Pinheiro, A. C., Carneiro-da-Cunha, M. G. & Vicente, A. A. (2012). Development and characterization of a nanomultilayer coating of pectin and chitosan—Evaluation of its gas barrier properties and application on ‘Tommy Atkins’ mangoes. *Journal of Food Engineering*, **110(3)**, 457–464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.021>
- Mohammadi, A., Hashemi, M. & Hosseini, S. M. (2015). Chitosan nanoparticles loaded with *Cinnamomum zeylanicum* essential oil enhance the shelf life of cucumber during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, **110(1)**, 203–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.08.019>
- Mohandas, A., Deepthi, S., Biswas, R. & Jayakumar, R. (2017). Chitosan based metallic nanocomposite scaffolds as antimicrobial wound dressings. *Bioactive Materials*, **3**, 267–277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2017.11.003>
- Mujtaba, M., Mosri, R. E., Kerch, G., Elsabee, M. Z., Kaya, M., Labidi, J. & Khawar, K. M. (2019). Current advancements in chitosan-based film production for food technology: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **121(1)**, 889–904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.109>
- Nurul-Hanani, M. Z., Halimahton-Zahrah, M. S. & Zaibunnisa, A. H. (2012). Effect of chitosan-palm stearin edible coating on the postharvest life of star fruits (*Averrhoa carambola* L.) stored at room temperature. *International Food Research Journal*, **19(4)**, 1433–1438.
- Nurul-Hanani, M. Z., Halimahton-Zahrah, M. S. & Zaibunnisa, A. H. (2016). Effect of edible lipid-chitosan film forming dispersion on postharvest life of guava stored at chilled temperature. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, **20(3)**, 618–625. DOI: <http://dx.doi.org/10.17576/mjas-2016-2003-22>
- Ortiz-Duarte, G., Pérez-Cabrera, L. E., Artés-Hernández, F., & Martínez-Hernández, G. B. (2019). Ag-chitosan nanocomposites in edible coatings affect the quality of fresh-cut melon. *Postharvest Biology and Technology*, **147(1)**, 174–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.021>
- Pagliarulo, C., Sansone, F., Moccia, S., Russo, G. L., Aquino, R. P., Salvatore, P., Di Stasio, M. & Volpe, M. G. (2016). Preservation of strawberries with an antifungal edible coating using peony extracts in chitosan. *Food and Bioprocess Technology*, **9(11)**, 1951–1960. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1779-x>
- Perdones, A., Sánchez-González, L. & Vargas, M. (2012). Effect of chitosan–lemon essential oil coatings on storage-keeping quality of strawberry. *Postharvest Biology and Technology*, **70(1)**, 32–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.04.002>
- Porat, R., Lichter, A., Terry, L. A., Harker, R. & Buzby, J. (2018). Postharvest losses of fruit and vegetables during retail and in consumers’ homes: Quantifications, causes, and means of prevention. *Postharvest Biology and Technology*, **139**, 135–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.11.019>
- Ramos-García, M., Bosquez-Molina, E., Hernández-Romano, J., Zavala-Padilla, G., Térres-Rojas, E., Alia-Tejacal, I., Barrera-Necha, L., Hernández-López, M. & Bautista-Baños, S. (2012). Use of chitosan-based edible coatings in combination with other natural compounds, to control *Rhizopus stolonifer* and *Escherichia coli* DH5 α in fresh tomatoes. *Crop Protection*, **38(1)**, 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.02.016>
- Ramos-Guerrero, A., González-Estrada, R., Hanako-Rosas, G., Bautista-Baños, S., Acevedo-Hernández, G., Tiznado-Hernández, M. E. & Gutiérrez-Martínez, P. (2018). Use of inductors in the control of *Colletotrichum gloeosporioides* and *Rhizopus stolonifer* isolated from soursop fruits: *in vitro* tests. *Food Science and Biotechnology*, **27(3)**, 755–763. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0305-5>

- Rasouli, M., Saba, M. K. & Ramezanian, A. (2019). Inhibitory effect of salicylic acid and Aloe vera gel edible coating on microbial load and chilling injury of orange fruit. *Scientia Horticulturae*, **247**, 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.12.004>
- Rico, F., Gutiérrez, C. & Díaz-Moreno, C. (2012). Effect of edible coating of chitosan and essential oils on microbiological quality of minimally processed mango (*Mangifera indica* L.). *Vitae*, **19 (1)**, S117–S119.
- Rinaudo, M. (2008). Behaviour of amphiphilic polysaccharides in aqueous medium. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, **11(1)**, 35–40.
- Rinaudo, M. (2014). Biomaterials based on a natural polysaccharide: alginate. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, **17(1)**, 92–96. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(14\)70322-5](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(14)70322-5)
- Robledo, S. N., Pierini, G. D., Díaz-Nieto, C. H., Fernández, H., & Zon, M. A. (2019). Development of an electrochemical method to determine phenolic monoterpenes in essential oils. *Talanta*, **196**, 362–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.12.069>
- Rodríguez-Guzmán, C. A., González-Estrada, R. R., Bautista-Baños, S. & Gutiérrez-Martínez, P. (2019). Efecto del quitosano en el control de *Alternaria* sp. en plantas de jitomate en invernadero. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, **22**, 1–7. DOI: [10.22201/fesz.23958723e.2018.2.137](https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.2.137)
- Rojas-Grau, M. A., Soliva-Fortuny, R. & Martín-Belloso, O. (2009). Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: a review. *Trends in Food Science & Technology*, **20(10)**, 438–447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.05.002>
- Romanazzi, G., Sanzani, S. M., Bi, Y., Tian, S., Gutiérrez-Martínez, P. & Alkan, N. (2016). Induced resistance to control postharvest decay of fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, **122**, 82–94.
- Shao, X., Cao, B., Xu, F., Xie, S., Yu, D. & Wang, H. (2015). Effect of postharvest application of chitosan combined with clove oil against citrus green mold. *Postharvest Biology and Technology*, **99(1)**, 34–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.07.014>
- Shi, S., Wang, W., Liu, L., Wu, S., Wei, Y. & Li, W. (2013). Effect of chitosan/nano-silica coating on the physicochemical characteristics of longan fruit under ambient temperature. *Journal of Food Engineering*, **118(1)**, 125–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.03.029>
- Solano-Doblado, L. G., Alamilla-Beltrán, L. & Jiménez-Martínez, C. (2018). Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, **21(2)**, 30–42. DOI: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.153>
- Sun, D., Liang, G., Xie, J., Lei, X. & Mo, Y. (2010). Improved preservation effects of litchi fruit by combining chitosan coating with ascorbic acid treatment during postharvest storage. *African Journal of Biotechnology*, **9 (22)**, 3272–3279.
- Sun, X., Narciso, J., Wang, Z., Ference, C., Bai, J. & Zhou, K. (2014). Effects of chitosan-essential oil coatings on safety and quality of fresh blueberries. *Journal of food science*, **79(5)**, 955–960. DOI: [10.1111/1750-3841.12447](https://doi.org/10.1111/1750-3841.12447)
- Torres-Aguirre, G. A., Muñoz-Bernal, O. A., Álvarez-Parrilla, E., Nuñez-Gastelum, J. A., Wall-Medrano, A., Sáyago-Ayerdi, S. G. & de la Rosa, L. A. (2018). Optimización de la extracción e identificación de compuestos polifenólicos en anís (*Pimpinella anisum*), clavo (*Syzygium aromaticum*) y cilantro (*Coriandrum sativum*) mediante HPLC acoplado a espectrometría de masas. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, **21(2)**, 103–115. DOI: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.2.137>
- USDA. (2016). United States Department of Agriculture. The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks. En K. C. Gross, C. Y. Wang, & M. Saltveit (Eds.), *Agriculture Handbook* (pp. 11–166). California, USDA. <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/oc/np/CommercialStorage/CommercialStorage.pdf>
- Valenzuela, C., Tapia, C., Lopéz, L., Bunger, A., Escalona, V. & Abugoch, L. (2015). Effect of edible quinoa protein-chitosan based films on refrigerated strawberry (*Fragaria × ananassa*) quality. *Electronic Journal of Biotechnology*, **18(6)**, 406–411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2015.09.001>
- Wang, F., Deng, J., jiao, J., Lu, Y., Yang, L. & Shi, Z. (2019). The combined effects of carboxymethyl-chitosan and *Cryptococcus laurentii* treatment on postharvest blue mold caused by *Penicillium italicum* in grapefruit fruit. *Scientia Horticulturae*, **253(1)**, 35–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.031>
- Wu, C., Wang, L., Fang, Z., Hu, Y., Chen, S., Sugawara, T. & Ye, X. (2016). The effect of the molecular architecture on the antioxidant properties of chitosan gallate. *Marine Drugs*, **14(5)**, 95. DOI: [10.3390/md14050095](https://doi.org/10.3390/md14050095)
- Xing, Y., Li, X., Xu, Q., Yun, J., Lu, Y. & Tang, Y. (2011a). Effects of chitosan coating enriched with cinnamon oil on qualitative properties of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*, **124(4)**, 1443–1450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.105>
- Xing, Y., Xu, Q., Che, Z., Li, X. & Li, W. (2011b). Effects of chitosan-oil coating on blue mold disease and quality attributes of jujube fruits. *Food & Function*, **2(8)**, 446–474. DOI: [10.1039/c1fo10073d](https://doi.org/10.1039/c1fo10073d)
- Xoca-Orozco, L. A., Cuellar-Torres, E. A., González-Morales, S., Gutiérrez-Martínez, P., López-García, U., Herrera-Estraella, L., Vega-Arreguín, J. & Chacón-López, A. (2017). Transcriptomic analysis of avocado Hass (*Persea americana* Mill) in the interaction system fruit-chitosan-colletotrichum, *Frontiers in Plant Science*, **8**, 956. DOI: [10.3389/fpls.2017.00956](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00956)

- Xu, D., Qin, H. & Ren, D. (2018). Prolonged preservation of tangerine fruits using chitosan/montmorillonite composite coating. *Postharvest Biology and Technology*, **143(1)**, 50-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.04.013>
- Xu, W. T., Huang, K. L., Guo, F., Qu, W., Yang, J. J., Liang, Z. H. & Luo, Y.B. (2007). Postharvest grapefruit seed extract and chitosan treatments of table grapes to control *Botrytis cinerea*. *Postharvest Biology and Technology*, **46(1)**, 86–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.03.019>
- Yang, G., Yue, J., Gong, X., Qian, B., Wang, H., Deng, Y. & Zhao, Y. (2014). Blueberry leaf extracts incorporated chitosan coatings for preserving postharvest quality of fresh blueberries. *Postharvest Biology and Technology*, **92(1)**, 46–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.01.018>
- Yin, C., Huang, C., Wang, J., Liu, Y., Lu, P. & Huang, L. (2019). Effect of chitosan- and alginate-based coatings enriched with cinnamon essential oil microcapsules to improve the postharvest quality of mangoes. *Materials*, **12**, 2039. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12132039>
- Youwei, Y. & Yinzhe, R. (2013). Grape preservation using chitosan combined with B-cyclodextrin. *International Journal of Agronomy*, **ID: 209235**, 1–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/209235>
- Yuan, G., Chen, X. & Li, D. (2016). Chitosan films and coatings containing essential oils: The antioxidant and antimicrobial activity, and application in food systems. *Food Research International*, **89(1)**, 117–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.004>
- Yu, Y., Zhang, S., Ren, Y., Li, H., Zhang, X. & Di, J. (2012). Jujube preservation using chitosan film with nano-silicon dioxide. *Journal of Food Engineering*, **113(3)**, 408–414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.021>
- Zhang, D., Wang, H., Hu, Y. & Liu, Y. (2015a). Chitosan controls postharvest decay on cherry tomato fruit possibly via the mitogen-activated protein kinase signaling pathway. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **63**, 7399–7404. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b01566>
- Zhang, L., Chen, F., Lai, L., Wang, H. & Yang, H. (2018). Impact of soybean protein isolate-chitosan edible coating on the softening of apricot fruit during storage. *LWT - Food Science and Technology*, **96(1)**, 604–611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.011>
- Zhang, Y., Zhang, M. & Yang, H. (2015b). Postharvest chitosan-g-salicylic acid application alleviates chilling injury and preserves cucumber fruit quality during cold storage. *Food Chemistry*, **174(1)**, 558–563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.106>