



ARTÍCULO DE REVISIÓN

Nuevas tecnologías en la elaboración y caracterización de empaques comestibles

Noemi Takebayashi-Caballero¹, Carlos Regalado-González¹, José Ángel Granados-Arvizu¹, Monserrat Escamilla-García^{1*}

¹Facultad de Química, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad Autónoma de Querétaro, C.U., Cerro de las Campanas S/N, Col. Las Campanas, Querétaro 76010, México

Recepción 23 de agosto de 2023. Aceptación 22 de noviembre de 2023

PALABRAS CLAVE

Empaques inteligentes
Películas comestibles
Microscopía
Raman
FT-IR

Resumen

Los empaques comestibles se definen como una matriz continua utilizada para cubrir a un alimento. La función de los empaques comestibles es proteger al alimento del ambiente manteniendo su integridad física, propiedades organolépticas y aumentar su vida de anaquel. Estos se pueden elaborar a partir de polisacáridos, lípidos, o una combinación de ambos para optimizar las propiedades que cada uno le otorga. El aumento del consumidor por productos mínimamente procesados y de alternativas para la conservación de alimentos, siendo los empaques activos e inteligentes una alternativa atractiva. Un empaque activo es todo aquel que posee una o varias sustancias que proveen una función activa, tales como, actividad antimicrobiana, capacidad antioxidante, entre otras. Mientras que, un empaque inteligente es todo aquel capaz de monitorear la calidad del alimento mediante escalas de color, ya sea por cambios en pH, ruptura de cadena de frío o presencia de microorganismos. Los pigmentos son uno de los compuestos más utilizados como indicadores de color de los cambios de pH y temperatura. El objetivo del presente trabajo es establecer las diferencias entre los diferentes tipos de empaque biodegradable, así como informar de las nuevas tecnologías de elaboración de empaques biodegradables y su caracterización. Los empaques inteligentes son una alternativa viable para el reemplazo de los empaques convencionales, ya que permiten conservar la integridad de los alimentos por mayores tiempos de almacenamiento, además de que permiten el monitoreo de la calidad de los alimentos.

Correspondencia: Monserrat Escamilla García. Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, Santiago de Querétaro 76010. Teléfono: (442) 192-12-00 ext.5526. Correo electrónico: monserrat.escamilla@uaq.mx

KEYWORDS

Smart packaging
Edible films
Microscopy
Raman
FT-IR

Abstract

Edible packaging is defined as a continuous matrix used to cover a meal. The function of edible packaging is to protect food from the environment, maintaining its physical integrity, organoleptic properties and increasing its shelf life. These can be made from polysaccharides, lipids, or a combination of to optimize the properties that each one gives them. The increase in consumer demand for minimally processed products and alternatives for food preservation, with active and intelligent packaging being an attractive alternative. An active packaging is anything that has one or more substances that provide an active function, such as antimicrobial activity, antioxidant capacity, among others. Meanwhile, intelligent packaging is any one capable of monitoring the quality of the food using color scales, whether due to changes in pH, breaking of the cold chain or presence of microorganisms. Pigments are one of the most used compounds as color indicators of changes in pH and temperature. The objective of this work is to establish the differences between the different types of biodegradable packaging, as well as to report on the new technologies to produce biodegradable packaging and its characterization. Smart packaging is a viable alternative to replacing conventional packaging, in addition, since it allows the integrity of food to be preserved for longer storage times, in addition to allowing food quality to be monitored.

Introducción

Los empaques comestibles representan una alternativa a los empaques de plástico ya que son elaborados a partir de materiales biodegradables. Estos protegen al alimento del ambiente para prolongar la vida de anaquel (González et al., 2020).

Al momento de elaborar una película, se debe de tomar en cuenta las características de los compuestos. Al utilizar almidón se debe considerar si es nativo o modificado, ya que los recubrimientos de almidón nativo no presentan una superficie tan adherente como sucede con recubrimiento a partir de almidón oxidado (Pardo et al., 2012). También es importante considerar las propiedades mecánicas de la película y su uso previsto. Por ejemplo, el almidón suele usarse como una alternativa ante plásticos biodegradables. Sin embargo, el carácter hidrofílico del almidón hace que no tenga resistencia mecánica y poca permeabilidad a los gases. Por lo cual, se opta por combinar compuestos para poder mejorar las propiedades de la película (Rodríguez-Marín et al., 2013) o bien se puede aplicar el entrecruzamiento de polímeros durante su elaboración. Las películas elaboradas a partir de polisacáridos o proteínas presentan propiedades mecánicas, ópticas y sensoriales deseables. Sin embargo, son sensibles a la humedad y tienen alto coeficiente de permeabilidad al vapor de agua. Por lo tanto, se opta por entrecruzar a los polímeros para mejorar sus propiedades (Arriaga et al., 2019) como se abordará más adelante.

A pesar de que los empaques comestibles representan una alternativa más sustentable comparada con los plásticos, es difícil alcanzar las mismas propiedades de barrera y mecánicas que éstos. Por ello, es necesario la caracterización de los empaques para poder garantizar propiedades mecánicas y de barrera adecuadas por el alimento apoyadas

por otras técnicas como microscopía, difracción y espectroscopía. Es por ello que el objetivo del presente es estudiar las nuevas técnicas de elaboración, aunadas a las existentes

1. Elaboración de empaques comestibles

1.1 Empaque comestible

El objetivo de los empaques es preservar y proteger al alimento del ambiente para poder alargar su vida útil. Estos empaques suelen estar hechos de plásticos que terminan siendo desechos no degradables. Por lo cual, se han buscado alternativas sostenibles con el ambiente. La forma más común es mediante la elaboración de recubrimientos o películas comestibles (Arredondo et al., 2017).

Un recubrimiento comestible (RC) es una matriz transparente continua, comestible y delgada que se usa en el empaque de los alimentos para preservar su calidad (Sánchez-González et al., 2008). Los componentes de un recubrimiento comestible son: polímero, solvente y plastificante. Los polímeros pueden ser hidrocoloides o lípidos, mientras que el solvente tiende a ser agua, la cual puede estar a diferente pH para poder solubilizar al polímero. Por otra parte, el plastificante sirve para emulsificar fases que no son miscibles y aportar flexibilidad y cierta resistencia al recubrimiento dado que reduce las fuerzas intermoleculares.

Existe una amplia gama de plastificantes como lo son el sorbitol, glicerol, manitol, sacarosa y polietilenglicol. Es importante tomar en cuenta que el plastificante a usar sea miscible en el polímero (Ávila-Sosa & López-Malo, 2008).



Figura 1. Película a base de quitosano.

Un empaque a base de hidrocoloide suele tener buenas propiedades mecánicas y de barrera para los gases, además de que no impide la transmisión de vapor de agua. Ejemplos de recubrimientos donde se emplean hidrocoloides son los que tienen base de polisacáridos como lo son celulosa, almidón, quitosano (Figura 1), alginatos, carragenanos, gelanos, pectinas de fruta, mucílago. También se pueden emplear proteínas de origen animal como gelatina, caseína, albúminas y proteínas de suero lácteo (Figura 2) o proteínas de origen vegetal (soja, zeína de maíz). En el caso de los recubrimientos a base de lípidos, éstos presentan buenas propiedades de barrera contra la humedad dado que forman compuestos hidrofóbicos. Sin embargo, su baja polaridad presenta la dificultad de producir los recubrimientos. Algunos ejemplos son aceites, ceras, ácidos grasos de bajo peso molecular y baja volatilidad. Debido a las ventajas y desventajas de los hidrocoloides y lípidos, se pueden mejorar sus propiedades al realizar una mezcla. Esto permite incrementar las ventajas de cada uno. Los lípidos presentan resistencia al vapor de agua mientras que los hidrocoloides permiten una permeabilidad selectiva al oxígeno y dióxido de carbono, además de aportar una cohesión estructural (Ginez Povez & Godoy Hernández, 2018).



Figura 2. Alternativas ante el uso excesivo de plástico en empaques.

1.1.1 Empaque activo con propiedades antimicrobianas

Una estrategia para alargar la vida de anaquel de los alimentos es adicionar agentes antimicrobianos para inhibir o reducir la carga microbiana. Considerando esta premisa, se puede hacer lo mismo con los recubrimientos comestibles. Agarwal et al. (2020) elaboraron una película a base de semillas de tamarindo, las cuales generalmente se desechan, y adicionaron geraniol, el cual es un terpeno que se puede extraer de diferentes aceites esenciales como el aceite de rosa. El geraniol, además de ser un compuesto “Generalmente Reconocido como Seguro o GRAS” se conoce su mecanismo de inhibición. Presenta actividad bactericida ya que altera las membranas celulares de los fosfolípidos, aumentando su permeabilidad; a su vez causando la pérdida de proteínas y lípidos, agotando las reservas de ATP y llevando al estrés oxidativo y muerte celular (Figura 3). También presenta actividad antifúngica ya que daña la membrana celular lo que reduce los niveles de ergosterol (componente esencial de las membranas).

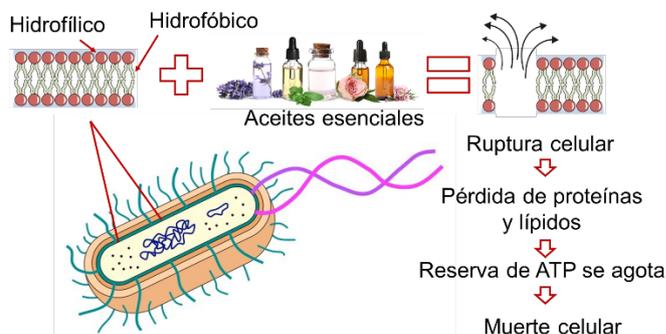


Figura 3. Actividad bactericida de los aceites esenciales.

Debido a que los aceites esenciales poseen una alta volatilidad que reduce su actividad antimicrobiana, Correa-Pacheco et al. (2019) encapsularon quitosano con aceite esencial de tomillo para obtener nano recubrimientos efectivos ante *Pectobacterium carotovorum*, bacteria deterioradora de los jitomates. Además, el recubrimiento ayudó a evitar la deshidratación del fruto ya que actuó como una barrera al paso de los gases. Naseri et al. (2020) produjeron una película comestible a base de gelatina-quitosano con aceite esencial de *Ferulago angulate* para prolongar la vida útil de carne de pavo. La película con 0.5% de aceite mostró el menor recuento de células viables totales de *Staphylococcus aureus* y coliformes para el día 9. Esto se le atribuye a los diterpenos fenólicos y el α -pineno.

Considerando lo anterior, se debe tener en cuenta a los microorganismos deterioradores de acuerdo con el tipo de alimento para elegir el agente antimicrobiano adecuado. Por ejemplo, Balaguer et al. (2013) usaron cinamaldehído a 1.5, 3 y 5% para inhibir a *Penicillium* y *Aspergillus niger*, los cuales son los principales contaminantes del pan. En cambio, Rossi et al. (2014) usaron natamicina y nisina para inhibir a los principales contaminantes del queso que son *Saccharomyces cerevisiae*, *Listeria monocytogenes* y *Listeria innocua*. La

natamicina es producida por *Streptomyces natalensis* y se usa como agente antifúngico debido a que se une al ergosterol sin permeabilizar la membrana, inhibiendo la fusión vacuolar. La nisina es un péptido antimicrobiano producido por cepas *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* y tiene actividad antibacteriana ante bacterias gram positivas como *Listeria monocytogenes*.

1.1.2 Empaque inteligente con el uso de pigmentos como indicadores de pH

El cambio de pH en los alimentos está relacionado con el crecimiento microbiano que origina su deterioro (Abedi-Firoozjah et al., 2022). La incorporación de pigmentos permite monitorear su frescura ya que éstos cambian de color con base al pH. Yao et al. (2021) elaboraron películas inteligentes de almidón/alcohol polivinílico adicionando betacianinas de pitaya roja, tuna, betabel y amaranto. Encontraron que a pesar de que las betacianinas vienen de diferentes fuentes (Figura 4), cambiaron de color en tonalidades parecidas; en pH 3-8 fue rojo, luego morado hasta llegar a un tono oliva. Los empaques se probaron en camarón fresco y cambiaron de color según los compuestos volátiles ricos en nitrógeno presentes en el alimento.

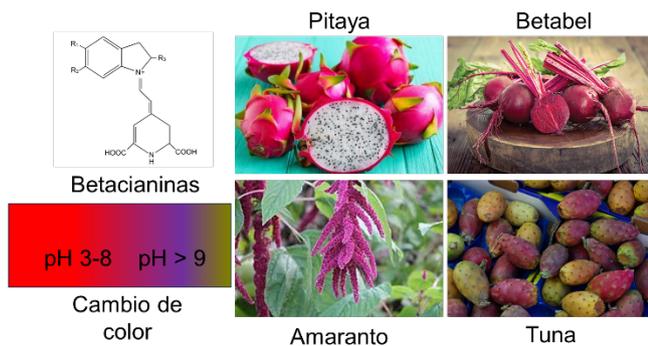


Figura 4. Estructura de betacianinas, fuentes y cambio de color.

Compuestos como las antocianinas se han usado debido a su cambio de color a diferentes pH. Pereira et al. (2015) elaboraron mezclas de quitosano con alcohol polivinílico adicionado con antocianinas de col morada. La adición de estos compuestos permitió monitorear el pH de la leche a diferentes temperaturas. En leche fresca fue de 6.7 a 20 °C y 6.6 a 25 °C. Cuando la leche estuvo por arriba de los 7 °C, comenzó a deteriorarse debido a la acumulación de ácido láctico derivado del metabolismo microbiano. La película cambió de gris oscuro (pH 6.7) a un tono más claro según el pH bajaba hasta 5, pero a un pH de 4.6 la película cambió a rosa intenso, indicando un posible deterioro del alimento.

Se han reportado algunas excepciones en el cambio de color en películas con pigmentos cuando se ponen en contacto con alimentos, como lo describió Bento et al. (2015). Estos autores elaboraron una película de quitosano, gelatina y alcohol polivinílico adicionada con extracto de col morada para monitorear el pH del queso ricotta. Su película tenía un color café claro y transcurridos 7 días en refrigeración no se

observó un cambio en la coloración.

Se sabe que otros pigmentos pueden cambiar de color, como los carotenoides y clorofila. Sin embargo, no se han realizado estudios extensos incorporándolos en películas inteligentes. Por ejemplo, Sharifi & Pirsá (2021) elaboraron una película de pectina de pulpa de morera negra encapsulada y también encapsularon clorofila con carboximetilcelulosa. Se sugiere que la clorofila se podría usar para empaques inteligentes ya que puede cambiar en medio de nitrato, pero el estudio sólo abarcó el potencial de la clorofila para actuar como agente antibacteriano y antioxidante como compuesto activo de la película.

1.2 Métodos tradicionales

Existen diferentes métodos para elaborar películas comestibles. El vaciado en caja (Figura 5), o casting, consiste en vaciar la solución en un recipiente y secar; luego se despega para aplicarse en alimentos. Para esto, se debe de considerar la temperatura y tiempo de secado ya que un secado rápido no permite asociaciones intermoleculares, afectando su cristalinidad y sus propiedades mecánicas (Solís Rivera, 2016).

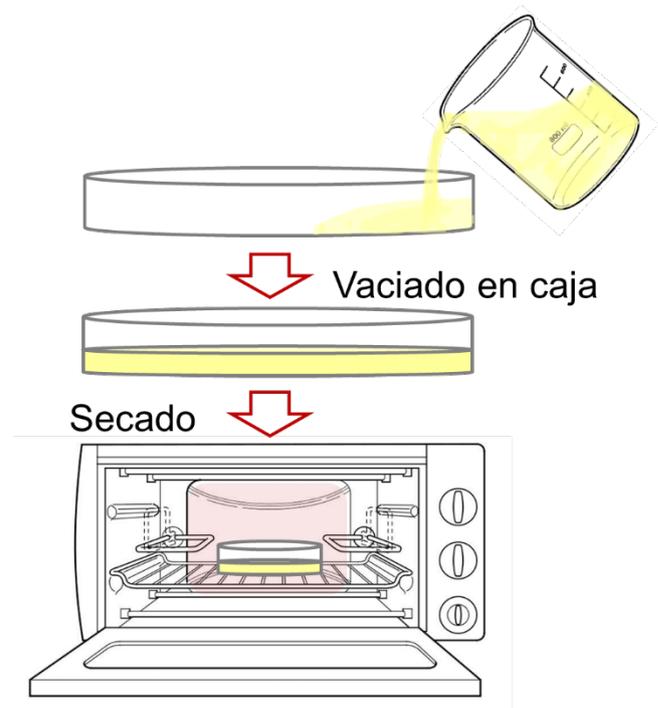


Figura 5. Vaciado en caja.

Los recubrimientos comestibles se producen mediante inmersión o aspersión (Oliveira et al., 2017) para los cuales se sumerge al alimento en la solución o se aplica mediante brochas, rociadores o espátulas y se deja secar para obtener el recubrimiento (Figura 6). La principal diferencia entre una película y un recubrimiento es que el recubrimiento está diseñado para ser consumido junto con el alimento (António, 2021; Cardona et al., 2020). El método de aspersión es ideal para soluciones con bajas viscosidades para ser rociadas bajo presiones altas. Para que el recubrimiento sea homogéneo,

se puede optar por aerosol electrostático que genera partículas uniformes por abajo de 100 nm, mucho menores a las producidas por rociado convencional. En el caso del recubrimiento por inmersión, es ideal cuando la superficie a cubrir es irregular ya que permite que toda la superficie del alimento se cubra y se puede remover el exceso de recubrimiento. Además, permite recubrimientos de mayor grosor, en comparación al método por aspersión (Bizymis & Tzia, 2021).



Figura 6. Diferentes maneras de producir un recubrimiento comestible.

También se puede usar la técnica de bicapa en la cual primero se forma la capa de proteína o polisacárido y luego la capa de lípidos (Figura 7). Aunque este método provee de una buena barrera ante el vapor de agua, se requiere de pasos adicionales: 2 vaciados y 2 secados (Aguirre-Joya *et al.*, 2018).

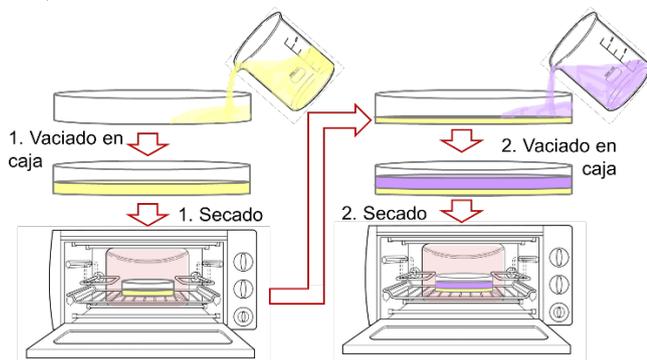


Figura 7. Técnica bicapa.

1.3 Nuevas técnicas

Para polímeros de alta viscosidad o en ausencia de disolventes, se puede usar un extrusor, lo que permite reducir el uso de reactivos, por lo tanto, implica un menor impacto ambiental. La extrusión consiste en convertir el material sólido en un fluido mediante calor y presión (Chiuyari Lino, 2019). Aunque este método puede ahorrar costos y tiempo, se deben tener consideraciones, como es el caso del almidón. Tanto la presión, calor y cizallamiento mecánico pueden romper la integridad de los puentes de hidrógeno entre las cadenas de almidón, causando cambios no deseados como gelatinización (causando menor viscosidad) o fragmentación (causando menor tamaño de partícula y daño estructural) (Leyva, 2018).

2. Caracterización de películas

2.1 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de una película hacen referencia a que ésta debe de tener una fuerza mecánica adecuada, así como no tener roturas o poros. Esto se puede cuantificar a través de tensión máxima (que consiste en la máxima tensión que la película puede soportar antes de romperse), el porcentaje de elongación (que consiste en medir qué tanto cambia la longitud original de la película) y el módulo de elasticidad, que es el cociente entre la tensión y la elongación (Figura 8) (Marzo Rojas, 2010).

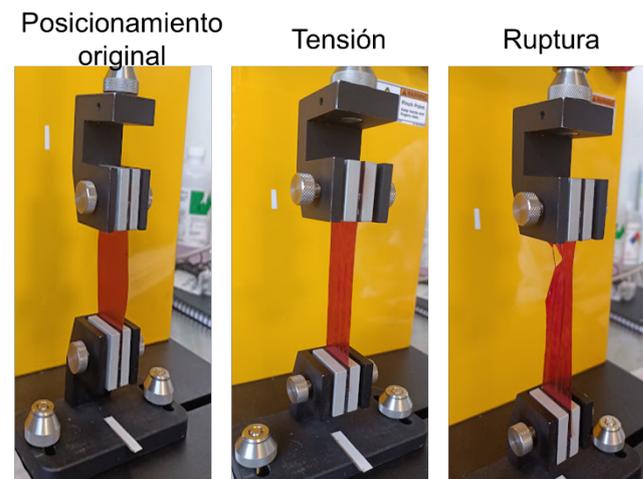


Figura 8. Texturómetro usado para medir la tensión, porcentaje de elongación y módulo de elasticidad.

Los componentes que se usan en la elaboración de la película tendrán un efecto sobre las propiedades mecánicas. Por ejemplo, los polisacáridos y proteínas forman redes moleculares, lo que le confiere cohesión y buenas propiedades mecánicas. En cambio, los lípidos, aunque son una barrera ante el vapor de agua, presentan malas propiedades mecánicas, lo que se traduce a una película quebradiza. Para mejorar la flexibilidad de las películas se puede usar plastificantes, o bien, emulsificantes para que los lípidos se dispersen en la matriz de la película (Famáa, *et al.*, 2003).

El almidón, compuesto de amilopectina y amilosa, es un polisacárido comúnmente usado en la formación de películas. La amilosa es el componente responsable de la formación de películas. Romero-Bastida *et al.* (2005) probaron almidones de diferentes fuentes (plátano y mango) y encontraron que la película a base de almidón de plátano tuvo mayor tensión a la fractura debido a que tiene mayor contenido de amilosa.

La adición de plastificantes aporta flexibilidad a la película ya que se sustituyen interacciones entre amilosa-amilopectina creando interacciones entre el plastificante y las moléculas de almidón. Sanyan *et al.* (2015) estudiaron el rol de los plastificantes sobre la resistencia a la tracción de las películas. Encontraron que películas con baja

concentración (>15% w/w) de plastificante ya sea glicerol o sorbitol, mostraron un alto valor de resistencia a la tracción debido a que hay más interacciones intermoleculares almidón-almidón, en comparación a almidón-plastificante. En concentraciones más altas (15-45% w/w) hubo una reducción en la resistencia a la tracción ya que se forman puentes de hidrógeno entre los plastificantes y el almidón, debilitando los enlaces entre las cadenas de almidón.

Liu et al. (2004) elaboraron películas a base de proteína de maní y estudiaron los efectos térmicos sobre las propiedades mecánicas. Encontraron que el calentamiento a 70-80 °C puede alterar la estructura tridimensional de las proteínas, exponer los grupos sulfhidrilos libres y cadenas laterales hidrofóbicas. Después del secado, como el solvente se evapora, existe una unión entre el disulfuro y los residuos hidrofóbicos causando un entrecruzamiento que causa un aumento de la resistencia mecánica.

2.2 Barrera a la transferencia de materia

Otro aspecto importante en la caracterización de una película es su permeabilidad. La finalidad de un empaque, en general, es actuar como barrera ante la transferencia de agua, solutos de alimentos y gases. Los gases y vapores pueden fluir a través de microporos o pequeñas grietas del material o bien, se pueden disolver en la superficie de la película y difundir a través de ésta por efecto del gradiente (Solis Rivera, 2016).

En general, la permeabilidad al vapor de agua aumenta si el componente de la película es hidrófilo, así como un mayor contenido de plastificante (Arreola González & Fuentes Ruiz, 2019).

Los recubrimientos comestibles se pueden usar en frutas y hortalizas para evitar su deterioro ya que éste se da por la respiración (consumo de oxígeno y liberación de dióxido de carbono) y pérdida de agua (deshidratación) del tejido vegetal. El uso de una película reduce la tasa de respiración y crea una barrera ante el vapor de agua, por lo que evita la deshidratación del vegetal (Pérez-Gago, 2008).

Pellá et al., (2020) reportaron que su recubrimiento a base de almidón de mandioca, gelatina y caseína fue efectivo para la preservación de guayabas, aumentando su vida útil por 2 días. Esto lo atribuyen a que el recubrimiento actúa como barrera y limita el paso de moléculas de agua hacia el ambiente. De manera similar, Trela (2022) reportó que su recubrimiento de almidón de mandioca y glicerol en frutas (carambola y quinoto) previnieron la pérdida de calidad, equivalente al mantenimiento de firmeza y apariencia de la fruta ya que el recubrimiento actúa como una barrera ante la pérdida de agua.

2.3 Espectroscopía

Cada molécula tiene un espectro infrarrojo (IR) característico debido a que cada una absorbe a determinada longitud de onda. Esta absorción se convierte en vibración molecular dependiendo de los enlaces químicos de la muestra. La

espectroscopía IR mide la absorción según la longitud de onda, que va de 4000-600 cm^{-1} y permite identificar los compuestos de una muestra. Un tipo de espectroscopía IR es FT-IR. Una fuente genera luz IR y pasa a través de un interferómetro para dirigirse a la muestra. Se obtiene un interferograma FTIR que representa la intensidad de la luz en función de la posición de un espejo móvil dentro del interferómetro. Para su representación IR, la señal se transforma por Fourier a una función en base a la longitud de onda (Petit & Puskar, 2018)

Otro tipo de espectroscopía es Raman. Primero un haz de luz monocromático incide sobre la muestra. Una porción de la luz se dispersa inelásticamente, lo que produce cambios de frecuencia equivalentes a variaciones de energía, que permiten identificar la muestra (Rodríguez, 2010).

FT-IR y espectroscopía de Raman se pueden usar como técnicas espectroscópicas vibratorias complementarias debido a que las bandas con intensidades fuertes en Raman pueden tener intensidades débiles en FT-IR y viceversa. Aunque Raman obtiene mejor resolución, puede tomar más tiempo ya que se tiene que probar diferentes fuentes y potencias de láser porque cada fuente y potencia produce diferentes señales espectrales. Por otra parte, el agua interfiere en análisis de FT-IR en mayor medida que Raman (Xu et al. 2019).

Jiménez et al. (2019) elaboraron una película comestible a partir de cáscara de plátano macho y pudieron observar la interacción entre sus componentes (lignina, celulosa y almidón) a través de FT-IR. Pudieron identificar compuestos por su banda característica. Por ejemplo, en la región de 1613 cm^{-1} encontraron una banda de absorción de agua. También pudieron identificar interacciones entre los compuestos, como en la región de 1700 a 1100 cm^{-1} la cual atribuyeron a vibraciones de los grupos acetil unidos a hemicelulosa. Además, encontraron las bandas de absorción entre 1125 y 1000 cm^{-1} las cuales se deben a un estiramiento de C-O y C-C por la presencia de xilanos y el enlace glucosídico.

Pandia-Estrada et al. (2021) elaboraron películas a base de gelatina y extracto de orégano. El uso de orégano en concentraciones de 2.5 y 5% causó una disminución en la intensidad de las bandas amidas. A mayor concentración (10%) se observó una disminución más significativa de las bandas amidas. Esto se puede deber a la interacción de los grupos -NH de los grupos aminos de la gelatina con puentes de hidrógeno del extracto. De este modo, FT-IR permite observar entrecruzamientos de los diferentes componentes de las películas.

Incluso se puede deducir el grado de interacción mediante FT-IR. Gavilán et al. (2016) elaboraron películas de quitosano y gelatina con sorbitol, glicerol o triacetina como plastificantes. En las películas sin plastificante se observó un pico de absorbancia correspondiente al grupo amida. Con la adición del plastificante, hubo una mayor intensidad en la banda del grupo amida y un desplazamiento a menor longitud

de onda (de 1542 cm^{-1} a 1536 cm^{-1} para glicerol y 1532 cm^{-1} para sorbitol). Esto indica que la interacción entre los polímeros y plastificantes se da a través de puentes de hidrógeno. En el caso de la adición de triacetina observaron un desplazamiento a menores longitudes de onda para las bandas características de gelatina, pero no las de quitosano. Esto indica que la triacetina interactúa en mayor medida con la gelatina, que con el quitosano. Además, pudieron observar un nuevo pico a 1218 cm^{-1} lo cual indicaría interacciones de Van de Waals entre los grupos ésteres de la gelatina y los alcóxiolos de la triacetina.

De manera similar, Raman proporciona información acerca de las interacciones entre los compuestos de la película. Por ejemplo, Urbizo-Reyes *et al.* (2020) elaboraron una película de mucílago de semilla de chía con glicerol o sorbitol. Las películas con mayor contenido de sorbitol mostraron mayor resistencia a la tracción y menor permeabilidad al vapor de agua. El análisis de Raman mostró cambios de 854 a 872 cm^{-1} y de 1061 a 1076 cm^{-1} , debido al aumento en los puentes de hidrógeno.

2.4 Difracción

La difracción de rayos X se utiliza para observar la estructura cristalina de las moléculas, o bien, para saber si la estructura es amorfa. Los difractogramas de películas comestibles revelan áreas amorfas y cristalinas dependiendo el polímero, plastificante, tipo de secado y contenido de humedad (Avramescu *et al.*, 2020).

Yakimets *et al.* (2007) evaluó la interacción del agua con polisacáridos (gelatina y almidón de yuca) e indicaron que entre mayor agua exista en la película, mayor sorción de agua existe por parte de los sitios hidrofóbicos del polisacárido en el caso de la gelatina. Para el almidón, los patrones de rayos X revelaron una estructura amorfa y, al aumentar la cantidad de agua no aumentó la sorción de moléculas agua, por lo que no existió reorganización de moléculas.

Martins *et al.* (2012) elaboraron películas a base de goma garrofín (LBG) y k-carragenina (k-car). Mediante difracción de rayos X, observaron que la película de LBG presenta una estructura no cristalina. La adición de k-car a la película de LBG provocó un reordenamiento desordenado que dio lugar a una película poco cristalina.

Suput *et al.* (2016) usaron difracción de rayos X donde las películas control, a base de almidón sin aceites esenciales, mostraron un amplio pico de difracción indicando la destrucción de la estructura cristalina de tipo A. Al adicionar aceite esencial (orégano y comino negro), se obtuvieron picos de difracción más estrechos.

Jaramillo *et al.* (2016) elaboraron películas comestibles a base de almidón de yuca con glicerol y diferentes concentraciones de yerba mate. El glicerol, como plastificante, ocupó espacios intermoleculares entre las cadenas de almidón, cambiando la organización molecular tridimensional del polímero. La adición de la yerba mate

redujo la cristalinidad, creando un patrón amorfo e impidiendo el fenómeno de retrogradación.

2.5 Microscopía

2.5.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía permite observar materiales que no se pueden ver a simple vista al magnificar a escala de milímetros a nanómetros. Un tipo de microscopía es la microscopía electrónica de barrido (SEM) que permite determinar la topografía de la superficie y homogeneidad. Esto permite identificar poros y grietas que podrían afectar la barrera y propiedades mecánicas de la película. Esta técnica utiliza electrones para formar una imagen. Para esto, un filamento genera un haz de electrones para iluminar la muestra y generar interacciones con la superficie. Luego los electrones son recogidos y se crea una imagen que refleja las características superficiales (Venkateshaiah *et al.*, 2020).

El fundamento de SEM se basa en emitir electrones por un cátodo de tungsteno a través de una columna al vacío, donde se concentra el haz inicial por medio de lentes electromagnéticas. Este haz se desplaza por la superficie de la muestra para “barrerla” como si fuera un pincel. Al hacer interaccionar el haz electrónico con la superficie, se producen electrones secundarios los cuales son captados por un detector y son incididos sobre un centelleador para que cada electrón produzca fotones. Los fotones son dirigidos a un fotomultiplicador a través del cañón de luz para que cada fotón produzca un fotoelectrón (Renau-Piqueras & Faura, 1994).

En cuanto a películas comestibles, SEM se puede usar para observar las porosidades ya que éstas aumentan la permeabilidad de la película. Soukoulis *et al.* (2014) evaluaron películas adicionadas con probióticos y mediante SEM, encontraron que la fibra probiótica con gelatina resultó en una estructura más compacta, sin microporos detectables, sugiriendo que los probióticos rellenan los espacios de la matriz. Además, a través de SEM se puede apreciar la distribución de cavidades lo cual afecta a la transmisión de vapor de agua. En caso de tener regiones sin cavidades, que se observan lisas, el recubrimiento tiende a ser brillante (González, 2018). SEM también permite determinar si el espesor del recubrimiento o la película es constante (Sánchez Aldana *et al.*, 2015).

2.5.2. Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

Existe otro tipo de microscopía llamada microscopía electrónica de transmisión (TEM). De acuerdo con Maeda *et al.* (2019), TEM es similar a microscopía de luz visible, con la diferencia que TEM usa un haz de electrones enfocados en lugar de luz visible. Con TEM, se puede obtener mayor resolución óptica ya que no está limitada a la longitud de onda de la luz visible. Esta técnica se basa en generar una fuente de electrones en alto vacío. Los electrones se aceleran hacia una muestra delgada y enfoca mediante lentes. TEM se

usa para investigar morfologías y estructuras de aleaciones metálicas, materiales inorgánicos y biológicos (Jiang et al., 2019).

González (2019) reportó el uso de TEM para determinar el tamaño de las nanopartículas de quitosano y las imágenes reveladas permitieron observar la forma (esférica) y distribución (uniforme) de las partículas. Por otra parte, Azeredo et al. (2009) examinaron nanofibras de celulosa con TEM y pudieron calcular las dimensiones (longitud y diámetro). Vachon et al. (2000) analizaron sus películas a base de caseinato de calcio y proteínas de suero mediante TEM y observaron la porosidad de las películas. De manera similar, Banerjee et al. (1996) observaron zonas esféricas pequeñas lo que les permitió inferir que existen agujeros microscópicos o bien, existen proteínas sueltas ya que la película examinada estaba elaborada a base de suero lácteo.

2.5.3. Microscopía de fuerza atómica (AFM)

Otra técnica para el análisis de los recubrimientos es el microscopio de fuerza atómica (AFM). Éste se desarrolló para superar un inconveniente que presentaba la microscopía de túnel de barrido (STM), el cual sólo podía obtener imágenes de superficies conductoras o semiconductoras, lo que significa que sólo los metales y los semiconductores eran candidatos para STM. Por lo tanto, AFM reemplazó a STM, con la gran ventaja de que puede obtener imágenes de cualquier tipo de superficie sin necesidad de preparación de la misma (Giessibl, 2003).

AFM se basa en la interacción de una punta (situada en un cantiléver) con la superficie de la muestra. La punta se desplaza sobre la superficie de la muestra y con esto, se generan fuerzas entre la punta y la muestra. Esto provoca deflexiones del cantiléver por acción de las fuerzas de Van Der Waals, permitiendo la generación de una micrografía de superficie (González & Castrellón-Urbe, 2005).

Existen diferentes modos de operación de AFM. El modo de contacto es un contacto continuo entre la punta y la muestra y tiene la ventaja de las altas velocidades de barrido. Su desventaja es que las fuerzas laterales pueden distorsionar la imagen. El modo de contacto intermitente se usa cuando no se quiere dañar la muestra por el constante contacto de la punta con la muestra. Tiene la ventaja de una mayor resolución lateral, pero una menor velocidad de barrido, aunque no alcanza resolución atómica. El modo sin contacto se basa en que el cantiléver vibra cerca de la superficie de la muestra (distancia entre 10 y 100 Angstroms). La desventaja es que la resolución puede no ser muy alta porque la punta no está cerca de la superficie y el barrido es lento. Además, el barrido se puede frenar si hay contaminación de agua ya que se confunde con la topografía (García & Kikut Cruz, 2020).

Bonilla Lagos (2013) usó AFM para cuantificar el impacto de los ingredientes activos en la topografía de la superficie de las películas, pudiendo así, determinar la rugosidad de la superficie. De modo similar, Pérez Masiá (2012) analizó la

estructura superficial de las películas mediante AFM; lo que le permitió distinguir que el ácido oleico y el ácido esteárico imparten cierta rugosidad a la película y generan relieves abruptos. Saber la rugosidad del recubrimiento mediante AFM puede ser útil ya que lo podemos correlacionar con la selectividad de los gases, como lo indicó Yáñez Crespo (2019).

Conclusiones

La elaboración de empaques comestibles permite reemplazar a los de plástico para reducir la contaminación. Un empaque biodegradable debería tener propiedades similares a los de plástico: ser una barrera entre el ambiente y el alimento. Es por lo que, al momento de diseñar la formulación del empaque, se debe considerar cómo los componentes afectarán las propiedades mecánicas del empaque; es decir, se espera una película flexible que no se rompa. También se debe de considerar la permeabilidad para evitar la pérdida de agua del alimento. Para poder estudiar la interacción entre sus componentes, se pueden emplear técnicas como FT-IR o Raman. Esto permite la deducción de interacciones entre los componentes y formación de puentes de hidrógeno o Van Der Waals. Aunque se espera que a simple vista la película se vea homogénea, se requiere de microscopía para poder observar porosidades que puedan interferir en su permeabilidad.

La tendencia de los empaques comestibles se ha centrado en adicionar agentes antimicrobianos para reducir o inhibir la carga microbiana presente en los alimentos que puedan deteriorar su calidad. Sin embargo, recientemente el enfoque radica en empaques comestibles inteligentes que permitan monitorear la calidad de los alimentos. Un ejemplo es el uso de pigmentos de fuentes naturales que pueden cambiar de color en función del pH.

Contribución de los autores

NTC, recolección de información y redacción.

MEG, diseño del trabajo, temas y recolección de información,

CRG, revisión de redacción y corrección de estilo.

JAGA, revisión de estilo, correcciones y redacción

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Presentaciones previas

Ninguna.

Referencias

1. Abedi-Firoozjah, R., Yousefi, S., Heydari, M., Seyedfatehi, F., Jafarzadeh, S., Mohammadi, R., ... & Garavand, F. (2022). Application of red cabbage anthocyanins as pH-sensitive

- pigments in smart food packaging and sensors. *Polymers*, 14(8), 1629.
2. Agarwal, S., Hoque, M., Bandara, N., Pal, K., & Sarkar, P. (2020). Synthesis and characterization of tamarind kernel powder-based antimicrobial edible films loaded with geraniol. *Food Packaging and Shelf*
 3. Aguirre-Joya, J. A., De Leon-Zapata, M. A., Alvarez-Perez, O. B., Torres-León, C., Nieto-Oropeza, D. E., Ventura-Sobrevilla, J. M., ... & Aguilar, C. N. (2018). Basic and applied concepts of edible packaging for foods. In *Food packaging and preservation* (pp. 1-61). Academic Press.
 4. António, J. F. D. R. (2021). Development of an active whey protein film using Portuguese green tea (*Camellia sinensis* L.) extract to enhance Latin-style fresh cheese shelf life (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra).
 5. Arredondo, M. Z. (2017). Evaluación de Propiedades Mecánicas y Permeabilidad al Vapor de Agua de Películas de Quitosano.
 6. Arreola González, A., & Fuentes Ruiz, A. (2019). Diseño y evaluación de un recubrimiento comestible para guayabas.
 7. Arriaga Perea, J. A. (2019). Evaluación de las propiedades físicas de películas de gliadinas con el uso de formaldehído como agente entrecruzante.
 8. Ávila-Sosa, R., & López-Malo, A. (2008). Aplicación de sustancias antimicrobianas a películas y recubrimientos comestibles. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, 2(2), 4-13.
 9. Avramescu, S. M., Butean, C., Popa, C. V., Ortan, A., Moraru, I., & Temocico, G. (2020). Edible and functionalized films/coatings—Performances and perspectives. *Coatings*, 10(7), 687.
 10. Azeredo, H. M., Mattoso, L. H. C., Wood, D., Williams, T. G., Avena-Bustillos, R. J., & McHugh, T. H. (2009). Nanocomposite edible films from mango puree reinforced with cellulose nanofibers. *Journal of food science*, 74(5), N31-N35.
 11. Balaguer, M. P., Lopez-Carballo, G., Catala, R., Gavara, R., & Hernandez-Munoz, P. (2013). Antifungal properties of gliadin films incorporating cinnamaldehyde and application in active food packaging of bread and cheese spread foodstuffs. *International journal of food microbiology*, 166(3), 369-377.
 12. Banerjee, R., Chen, H., & Wu, J. (1996). Milk protein-based edible film mechanical strength changes due to ultrasound process. *Journal of Food Science*, 61(4), 824-828.
 13. Bento, L. M., Silva-Pereira, M., Chaves, K., & Stefani, R. (2015). Development and evaluation of a smart packaging for the monitoring of ricotta cheese spoilage. *MOJ Food Process. Technol*, 1, 3-5.
 14. Bizymis, A. P., & Tzia, C. (2021). Edible films and coatings: Properties for the selection of the components, evolution through composites and nanomaterials, and safety issues. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-16.
 15. Bonilla Lagos, M. J. (2013). Desarrollo de films y recubrimientos comestibles bio-activos como soporte de agentes antioxidantes y antimicrobianos (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
 16. Cardona, C. E. O., & Fernández, X. A. (2020). Quitosano: una alternativa sustentable para el empaque de alimentos. *Revista Digital Universitaria*, 21(5).
 17. Chiuyari Lino, J. A. (2019). Descripción de actividades para asegurar el control de calidad en las películas plásticas producidas en la Empresa Oppfilm Perú SA.
 18. Correa-Pacheco, Z. N., García-Paniagua, K. D., Bautista-Baños, S., & Corona-Rangel, M. L. (2019). Effect of chitosan-thyme essential oil nanocoatings on postharvest quality of tomato fruit. *Mexican Journal of Phytopathology*, 37(1).Life, 26, 100562.
 19. Famáa, L., Rojasb, A. M., Goyanesa, S., & Gerschensonb, L. (2003). Películas comestibles de aplicación industrial. *Trabajo*, 10(5).
 20. García, A., & Kikut Cruz, K. (2020). Atomic force microscopy as a tool in asphalt research. *Infraestructura Vial*, 22(40), 20-27.
 21. Gavilán, F. J. P. (2016). Estudio de la interacción entre plastificantes y polímeros formadores de una película comestible mediante la correlación entre sus parámetros espectroscópicos y mecánicos (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile)).
 22. Giessibl, F. J. (2003). Advances in atomic force microscopy. *Reviews of modern physics*, 75(3), 949.
 23. Ginez Povez, P., & Godoy Hernández, M. S. (2018). Formulación de un recubrimiento comestible preservante de arándano empleando mucilago extraído de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*).
 24. González, L. R. R. (2018). Caracterización de dispersiones filmogénicas a base de almidón de maíz y ácido oleico en nanoemulsión con capacidad de formación de recubrimientos comestibles activos.
 25. González, M. C. R., & Castrellón-Urbe, J. (2005). Microscopio de fuerza atómica. *Encuentro de Investigación en Ingeniería Eléctrica*, 17-18.
 26. González, M. D. C. M. (2019). Efecto de cubiertas comestibles con nanopartículas de quitosano y/o propóleo sobre la calidad y capacidad antioxidante de fresas/fragaria x ananassa.
 27. González, S. M. R., Reyes, M. D. J. B., Márquez, G. R., Saucedo, C. A. D., & Martínez, M. H. (2020). CARACTERIZACIÓN NO DESTRUCTIVA DE FORMULACIÓN DE EMPAQUES COMESTIBLES USANDO TOMOGRAFÍA DE COHERENCIA ÓPTICA. *Miscelánea Científica en México*, 91.
 28. Jaramillo, C. M., Gutiérrez, T. J., Goyanes, S., Bernal, C., & Famá, L. (2016). Biodegradability and plasticizing effect of yerba mate extract on cassava starch edible films. *Carbohydrate polymers*, 151, 150-159.
 29. Jiang, X., Higuchi, T., & Jinnai, H. (2019). Transmission Electron Microscopy. In *Molecular Soft-Interface Science* (pp. 147-153). Springer, Tokyo.
 30. Jiménez, A., Hernández, K. L., Collahuazo-Reinoso, Y., Avilés, R., Pino, J. A., & García, M. A. (2019). Película comestible a partir de cáscara de plátano macho (*Musa paradisiaca* L.): Edible film from of plantain peel (*Musa paradisiaca* L.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 29(3), 49-57.
 31. Leyva, A. P. L. (2018). Desarrollo de películas comestibles a base de almidón acetilado y gelatina y su aplicación en un fruto modelo (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOIA).
 32. Liu, C. C., Tellez-Garay, A. M., & Castell-Perez, M. E. (2004). Physical and mechanical properties of peanut protein films. *LWT-Food science and technology*, 37(7), 731-738.
 33. Maeda, M., Takahara, A., Kitano, H., Yamaoka, T., & Miura, Y. (2019). *Molecular soft-interface science*. Springer Japan.
 34. Martins, J. T., Cerqueira, M. A., Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Souza, B. W., & Vicente, A. A. (2012). Synergistic effects between κ -carrageenan and locust bean gum on physicochemical properties of edible films made thereof. *Food Hydrocolloids*, 29(2), 280-289.
 35. Marzo Rojas, I. (2010). Efecto del tipo y contenido de aceites esenciales sobre las propiedades mecánicas y barrera de películas comestibles basadas en zeína.
 36. Naseri, H. R., Beigmohammadi, F., Mohammadi, R., & Sadeghi, E. (2020). Production and characterization of edible film based on gelatin-chitosan containing Ferulago angulate essential oil and its application in the prolongation of the shelf life of turkey meat. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(8), e14558.
 37. Oliveira, S. P. L. F., Bertan, L. C., De Rensis, C. M. V. B., Bilck, A. P., & Vianna, P. C. B. (2017). Whey protein-based films incorporated with oregano essential oil. *Polímeros*, 27, 158-164.
 38. Pandia-Estrada, S., Romero-Santivañez, R., Céspedes-Chombo, R., & Solari-Godíño, A. (2021). Películas comestibles a base de gelatina obtenida de piel de mahi-mahi (*Coryphaena hippurus*) y extracto de orégano: Características fisicoquímicas, antimicrobianas, estructurales y de superficie. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 229-237.
 39. Pardo Cuervo, O. H., & Velasco Mosquera, R. (2012). Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de películas obtenidas a partir de almidón nativo y oxidado de arracacha. *Revista ION*, 25(SPE), 23-29.
 40. Pellá, M. C., Silva, O. A., Pellá, M. G., Beneton, A. G., Caetano, J., Simões, M. R., & Dragunski, D. C. (2020). Effect of gelatin and casein additions on starch edible biodegradable films for fruit surface coating. *Food chemistry*, 309, 125764.
 41. Pereira Jr, V. A., de Arruda, I. N. Q., & Stefani, R. (2015). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from *Brassica oleracea* (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 43, 180-188.
 42. Pérez Masiá, R. (2012). INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE FILMS A BASE DE CASINATO

- SÓDICO Y ÁCIDO OLEICO O ESTÉARICO.
43. Pérez-Gago, B., Del Río, M. A., & Rojas-Argudo, C. (2008). Recubrimientos comestibles en frutas y hortalizas. *Horticultura*. Recuperado de Interpresas. net (2019, mayo) recuperado de www.interempresas.net/Horticola/Articulos/Actualidad.
 44. Petit, T., & Puskar, L. (2018). FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation. *Diamond and Related Materials*, 89, 52-66.
 45. Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1994). Principios básicos del microscopio electrónico de barrido.
 46. Rodríguez, I. G. (2010). Facultad de Ciencias.
 47. Rodríguez-Marín, M. L., Bello-Pérez, L. A., Yee-Madeira, H., & González-Soto, R. A. (2013). Propiedades mecánicas y de barrera de películas elaboradas con harina de arroz y plátano reforzadas con nanopartículas: estudio con superficie de respuesta. *Revista mexicana de ingeniería química*, 12(1), 165-176.
 48. Romero-Bastida, C. A., Bello-Pérez, L. A., García, M. A., Martino, M. N., Solorza-Feria, J., & Zaritzky, N. E. (2005). Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starches. *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 235-244.
 49. Sánchez Aldana, D., Contreras-Esquivel, J. C., Nevárez-Moorillón, G. V., & Aguilar, C. N. (2015). Caracterización de películas comestibles a base de extractos pécticos y aceite esencial de limón Mexicano. *CyTA-Journal of Food*, 13(1), 17-25.
 50. Sánchez-González, L., Vargas, M., González-Martínez, C., Cháfer, M., & Chiralt, A. (2008). Incorporación de productos naturales en recubrimientos comestibles para la conservación de alimentos. In *Memorias VIII Congreso SEAE "Alimentación y Agricultura Ecológica"*. Ed. Sociedad Española de Agricultura Ecológica. Bullas, Murcia, España.
 51. Sharifi, K. A., & Pirsá, S. (2021). Biodegradable film of black mulberry pulp pectin/chlorophyll of black mulberry leaf encapsulated with carboxymethylcellulose/silica nanoparticles: Investigation of physicochemical and antimicrobial properties. *Materials Chemistry and Physics*, 267, 124580.
 52. Solís Rivera, S. I. (2016). Elaboración y caracterización de películas comestibles elaboradas con hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC).
 53. Soukoulis, C., Behboudi-Jobbehdar, S., Yonekura, L., Parmenter, C., & Fisk, I. D. (2014). Stability of *Lactobacillus rhamnosus* GG in prebiotic edible films. *Food Chemistry*, 159, 302-308.
 54. Suput, D., Lazic, V., Pezo, L., Markov, S., Vastag, Z., Popovic, L., ... & Popovic, S. (2016). Characterization of starch edible films with different essential oils addition. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 66(4).
 55. Trela, V. D. (2022). Preservación de frutas tropicales (Quinoto, Mora y Carambola) aplicando recubrimientos comestibles.
 56. Urbizo-Reyes, U., San Martín-González, M. F., García-Bravo, J., & Liceaga, A. M. (2020). Development of chia seed (*Salvia hispanica*) mucilage films plasticized with polyol mixtures: Mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 854-864.
 57. Vachon, C., Yu, H. L., Yefsah, R., Alain, R., St-Gelais, D., & Lacroix, M. (2000). Mechanical and structural properties of milk protein edible films cross-linked by heating and γ -irradiation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3202-3209.
 58. Venkateshaiah, A., Padil, V. V., Nagalakshmaiah, M., Waclawek, S., Černík, M., & Varma, R. S. (2020). Microscopic techniques for the analysis of micro and nanostructures of biopolymers and their derivatives. *Polymers*, 12(3), 512.
 59. Xu, J. L., Thomas, K. V., Luo, Z., & Gowen, A. A. (2019). FTIR and Raman imaging for microplastics analysis: State of the art, challenges and prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 119, 115629.
 60. Yakimets, I., Paes, S. S., Wellner, N., Smith, A. C., Wilson, R. H., & Mitchell, J. R. (2007). Effect of water content on the structural reorganization and elastic properties of biopolymer films: a comparative study. *Biomacromolecules*, 8(5), 1710-1722.
 61. Yáñez Crespo, A. A. (2019). Funcionalización y caracterización de derivados de quitosano (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
 62. Yao, X., Qin, Y., Zhang, M., Zhang, J., Qian, C., & Liu, J. (2021). Development of active and smart packaging films based on starch, polyvinyl alcohol and betacyanins from different plant sources. *International journal of biological macromolecules*, 183, 358-368.