

## Películas de almidón de papa (*Solanum tuberosum* L.), empaques innovadores para alimentos: una revisión

## Potato (*Solanum tuberosum* L.) starch films, innovate packaging for food: a review

A.B. Lara-Gómez <sup>a</sup>, R.Y. Aguirre-Loredo <sup>b</sup>, J. Castro-Rosas <sup>a</sup>, E. Rangel-Vargas <sup>a</sup>, M. Hernández-Juárez <sup>a</sup>, C.A. Gómez-Aldapa <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> CONACYT-CIQA, Departamento de Procesos de Polimerización, 25294, Saltillo, Coahuila, México.

### Resumen

El incremento poblacional de los próximos años, causará el aumento de empaques plásticos no biodegradables destinados a la protección de alimentos, lo que dificultará garantizar la seguridad alimentaria, sin afectar el ambiente. Dentro de los bioplásticos, el uso de películas hechas a partir de almidón, tiene potencial para sustituir gradualmente a los empaques tradicionales; sin embargo, su uso en los alimentos es limitado aún debido a sus propiedades funcionales débiles. A nivel industrial, se ha buscado generar películas de almidón a partir de los residuos de biomasa agrícola, con el fin de disminuir el impacto ambiental, generando una economía circular. Por ello, esta revisión recopila las investigaciones de los últimos cinco años que buscan mejorar las propiedades funcionales de las películas de almidón de papa, para obtener empaques capaces de extender la vida de anaquel de los alimentos y garanticen la seguridad alimentaria con precursores sostenibles a través de una economía circular.

**Palabras Clave:** Almidón, Películas, Biopolímeros, Empaques, Seguridad alimentaria.

### Abstract

The population increase in the coming years will cause the increase of non-biodegradable plastic packaging for food protection, which will make it difficult to ensure food safety, without affecting the environment. Within bioplastics, the use of starch films has the potential to gradually replace traditional packaging; however, its use in foods is still limited given its weak functional properties. Industry research has sought to generate starch films from agricultural biomass waste to reduce environmental impact by generating a circular economy. For this reason, this review compiles the research of the last five years that seeks to improve the functional properties of potato starch films to obtain packaging capable of extending the shelf-life of the food that ensures food security with sustainable precursors through a circular economy.

**Keywords:** Starch, Films, Biopolymers, Packaging, Food safety.

### 1. Introducción

En 2018 a nivel mundial, se generaron 360 millones de toneladas métricas de empaques plásticos (Chen et al., 2021), correspondiendo el 40% a desechos de empaques de alimentos, de los cuales, menos del 5% fue reciclado (Bhargava et al., 2020).

El uso incesante de empaques sintéticos se ha vuelto un problema grave de salud pública y ambiental, este problema se

debe a que los plásticos son difícilmente biodegradables, no obstante, en ocasiones, el plástico puede llegar a reducirse a partículas diminutas (micro plásticos, Figura 1), que se dispersan en diversas matrices ambientales, volviéndose difíciles de eliminar (Blackburn & Green, 2022). Su incremento ha provocado enfermedades al humano, debido al consumo de micro plásticos y sustancias derivadas de los plásticos; además, causa afectaciones ambientales y a la biota, por su ingesta y por su difícil biodegradación.

\*Autor para la correspondencia: [cgoeza@uaeh.edu.mx](mailto:cgoeza@uaeh.edu.mx)

**Correo electrónico:** [la347145@uaeh.edu.mx](mailto:la347145@uaeh.edu.mx) (Ariadna Bárbara Lara-Gómez), [yaneli.aguirre@ciqa.edu.mx](mailto:yaneli.aguirre@ciqa.edu.mx) (Rocío Yaneli Aguirre Loredo), [jcastro@uaeh.edu.mx](mailto:jcastro@uaeh.edu.mx) (Javier Castro Rosas), [esme\\_ran70@hotmail.com](mailto:esme_ran70@hotmail.com) (Esmeralda Rangel Vargas), [martin\\_hernandez@uaeh.edu.mx](mailto:martin_hernandez@uaeh.edu.mx) (Martín Hernández Juárez), [cgoeza@uaeh.edu.mx](mailto:cgoeza@uaeh.edu.mx) (Carlos Alberto Gómez Aldapa).

La generación de productos plásticos actualmente requiere del uso de recursos no renovables como gas, petróleo y agua para satisfacer la demanda, contribuyendo a la generación de gases de efecto invernadero (Wesolowski et al., 2020), abonando al calentamiento global.



Figura 1: Micro plásticos. Tomado de Pixabay, 2022.

Generalmente los materiales de empaquetado son de plástico, acero, aluminio, vidrio y papel. El plástico es el más utilizado por su flexibilidad, ligereza, formalidad a baja temperatura, resistencia a la rotura y al estallido, fácilmente termo sellables, además de sus excelentes propiedades de barrera al oxígeno y a la humedad (Vaclavik & Christian, 2014).

Hoy en día, existen diseños de envases biodegradables que abren paso hacia la transición del uso sostenible de productos sustentables. Algunos de estos envases aun no pueden ser utilizados de manera extensiva en todos los alimentos, ya que no cumplen con todas las características necesarias y funcionales para lograr conservar y aumentar la vida útil del alimento (Kumar et al., 2020a).

El uso de materiales a base de biopolímeros para fabricar empaques, es una de las alternativas prometedoras en la que las investigaciones se han enfocado. Los biopolímeros derivados de productos agrícolas son económicos, de fácil acceso, biodegradables y abundantes en la naturaleza, es por ello que son una excelente opción para reemplazar los envases plásticos (Kumar et al., 2020b).

La industria alimentaria en conjunto con la biotecnología, están encaminadas en desarrollar alternativas de empaque en forma de recubrimientos y películas biodegradables (Pellicer et al., 2017; De Pilli et al., 2021), en las que han utilizado principalmente polisacáridos como alginato, pectina, carragenina, quitosano, celulosa y almidón.

De este último, se han elaborado películas, sin embargo, sus propiedades mecánicas aun no pueden competir con las que presentan las películas sintéticas, lo que dificulta empaquetar productos húmedos; en consecuencia, se ha buscado innovar la conjugación con otros biopolímeros, con la finalidad de mejorar su desempeño mecánico y de barrera (Gautam et al., 2021; Khalil et al., 2018).

Debido a que las investigaciones que buscan garantizar la seguridad alimentaria están enfocadas en encontrar materiales biodegradables de envasado, que posean propiedades que incrementen su funcionalidad, es importante reconocer este tema de generación de sustitutos plásticos como de suma

importancia (Flores, 2020). Sobre todo, si se emplean materias primas de bajo costo, que son obtenidas de residuos agrícolas que, al ser materiales biodegradables, pueden reintegrarse al ambiente en menor tiempo y con menor impacto en comparación con los plásticos tradicionales actuales.

La seguridad alimentaria interviene en los procesos y actividades que se realizan antes y después del procesamiento de alimentos, con el fin de asegurar que se encuentren fuera de peligros, como toxinas, microorganismos y productos químicos. No obstante, la seguridad alimentaria, también involucra a las actividades agropecuarias, que buscan nuevas tecnologías para satisfacer la demanda de alimentos seguros (Barbosa-Cánovas et al., 2014).

Las películas a base de biopolímeros que pueden ser usadas como empaques, tienen la finalidad de mantener la calidad y la seguridad en el consumo de alimentos, gracias a que además de proteger el producto, también permiten reducir el desperdicio de los mismos, asegurar su almacenaje, disminuir pérdidas económicas y preservar la salud del consumidor, en general, mejorar la seguridad alimentaria (Alizadeh-Sani et al., 2020).

Por ello, es importante destacar cuales son las principales características de las películas obtenidas a base de polímeros biodegradables como el almidón, así como las últimas innovaciones que pretenden la mejora en el desarrollo de materiales para la generación de empaques de alimentos.

Para la elaboración de este documento se ha realizado una revisión en las plataformas digitales de bases de datos Scimedirect y Springer, introduciendo las palabras clave “film”, “starch”, “food” “potato”, “food safety”, “barrier properties” y “mechanical properties” seleccionando solo las investigaciones originales de los últimos 5 años (2018-2022). De los artículos de investigación original, libros y capítulos de libro obtenidos en Scimedirect y Springer, se han seleccionado cuidadosamente aquellos que desarrollan investigación original, donde el polímero empleado fue el almidón de papa, con énfasis en artículos donde las formulaciones para la obtención de las películas fueron únicas.

## 2. Bioplásticos, la alternativa a los plásticos

La rápida acumulación de plásticos no biodegradables en el ambiente, ha llevado a buscar formas de resolver este importante problema ambiental (Goel et al., 2021). Kumar (2018), reconoce algunas alternativas, entre las que destacan regresar hacia el uso de vidrio, preferir el uso de bolsas reutilizables, aumentar la fabricación de materiales plásticos a partir de elementos biodegradables, como lignina, plumas de pollo, caseína de leche y poliésteres alifáticos; además de bioplásticos a partir de biopolímeros de biomasa, como el almidón.

El almidón se ha empleado de manera predominante en las investigaciones desarrolladas en los últimos años en la búsqueda de la sustitución de empaques plásticos, por plásticos biodegradables, también llamados bioplásticos. Los bioplásticos se pueden definir como materiales de base biológica (derivados de biomasa) y/o de origen biodegradable (Goel et al., 2021); por ende, su uso garantizaría la seguridad alimentaria. Actualmente, se ha reportado que la producción mundial de bioplásticos representa solo el 0.5% de la fabricación total de plásticos, siendo el empaquetado su principal funcionalidad (Tan et al., 2021a).

Hoy en día los envases y empaques a base de biopolímeros que más se desarrollan son con almidón, añadiendo en su mezcla sustancias que modifican sus propiedades mecánicas,

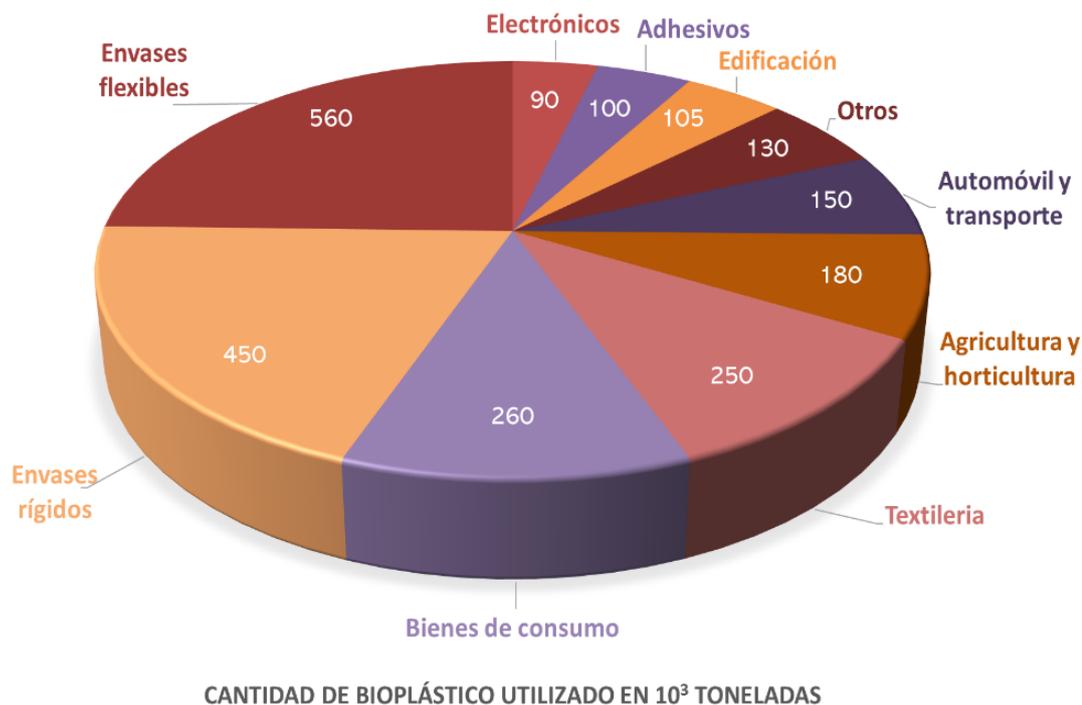


Figura 2: Gasto por toneladas de biopolímeros según sus principales áreas de aplicación. Adaptada de datos de Nanda et al., 2022 y Kumar et al., 2020.

## 2.1. Biopolímeros

Los biopolímeros al igual que los polímeros sintéticos, son moléculas de cadena larga con muchos monómeros (Wesolowski et al., 2020), pero de origen natural y biodegradable, que han sido sintetizados por procesos biológicos o químicos (Ramos, 2021). Los biopolímeros se distinguen por ser parte de la síntesis de procesos biológicos de los organismos, como los polinucleótidos (ADN y ARN), polipéptidos (proteínas) y polisacáridos (azúcares polimerizados) (Runnels et al., 2018; Valero-Valdivieso et al., 2013).

El material de envasado formulado con biopolímeros se puede dividir por su origen y producción en: *biomasa*: fabricados a partir de moléculas de la biomasa como polisacáridos y proteínas. Aquí se encuentra el uso de almidón y celulosa, así como sus derivados. *Monómeros*, *Bio-derivados*: son sintetizados por polimerización y regularmente se emplea el poli lactato y aceites vegetales. Aquí se ubica la producción de poliuretanos, poliamidas, resinas acrílicas resinas epoxi y poliéster amidas. *Organismos*: son producidos a partir de microorganismos y abarcan aquellos generados a partir de polihidroxialcanoatos sintetizados por bacterias que reservan carbono y energía (De Pilli et al., 2021; Valero-Valdivieso et al., 2013).

Los biopolímeros son biodegradables y tardan entre 3 y 6 meses en hacerlo totalmente, en comparación con los productos plásticos de origen petroquímico, que tardan miles de años (Nanda et al., 2022). Su principal uso es la obtención de bioplásticos que pueden utilizarse en distintas áreas de valor agregado (Figura 2) (Pellicer et al., 2017).

para su funcionamiento como película o recubrimiento. Se ha propuesto la combinación de compuestos hidrocoloides con lípidos, materiales mixtos de biopolímeros y polímeros sintéticos que, al conjugarse con un biopolímero serán biodegradables; sin embargo, la búsqueda de nuevas combinaciones y mezclas que incluyan algunos aditivos como plastificantes, pigmentos, antioxidantes y agentes antimicrobianos es un área de investigación que aún está en desarrollo (Pellicer et al., 2017).

### 2.1.1. Almidón

El almidón es uno de los polisacáridos más abundantes en la naturaleza, de bajo costo, que representa la principal reserva energética de las plantas y que constituye más del 60% de las semillas de cereales (Jiménez et al., 2012); se sintetiza en los amiloplastos de las plantas y se almacena principalmente en semillas (maíz, trigo, arroz), raíces o tubérculos, estos últimos con el mayor contenido de almidón (Gautam et al., 2021).

Los gránulos de almidón están conformados por amilosa (molécula esencialmente lineal de unidades de anhidroglucosa  $\alpha$ -1,4) en un 25% y amilopectina (molécula ramificada de cadenas cortas de  $\alpha$ -1,4 unidas por enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,6) en un 75% (Figura 3) (Jiménez et al., 2012; Mohammadi-Nafchi et al., 2013). La amilopectina confiere la cristalinidad al almidón y el porcentaje de cristalinidad de los gránulos de almidón se relaciona a la proporción de amilosa-amilopectina presente en los mismos (Brigham, 2018).

Mientras que la amilosa, forma complejos helicoidales con compuestos aromáticos, emulsionantes y lípidos, llamados complejos de amilosa tipo V (Wang et al., 2019). Aunque la amilosa permite la formación de películas fuertes, isotrópicas, inodoras, insípidas e incoloras (Jiménez et al., 2012), se ha

observado que combinar dos o más biopolímeros permite conseguir materiales con propiedades mecánicas, que pueden ser una alternativa efectiva para la sustitución de empaques plásticos (Gautam et al., 2021; Gómez-Aldapa et al., 2020a).

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría gracias a los enlaces de hidrógeno que unen a las cadenas, no obstante; al calentarse, se rompen los enlaces y se solubilizan las moléculas que constituyen al almidón, si se calienta entre 65 y 100 °C se puede gelatinizar irreversiblemente (Jiménez et al., 2012) y luego por extrusión utilizarse para la fabricación de termoplásticos (Brigham, 2018; Kumar et al., 2020b). No obstante, la hidrofilia inerte y la alta densidad de almidón originan bioplásticos higroscópicos y quebradizos (Gonçalves et al., 2020), por ello, es necesario plastificar y/o modificar fisicoquímicamente al almidón (Menzel, 2020).

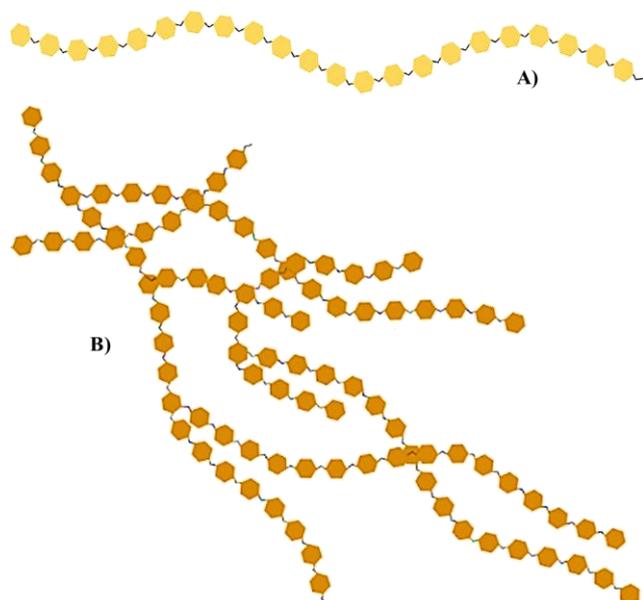


Figura 3: Estructura del almidón. A) Amilosa, cadena lineal de anhidroglucosa  $\alpha$ -1,4. B) Amilopectina, cadena ramificada de anhidroglucosa  $\alpha$ -1,4, unidas por enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,6. Elaboración propia.

## 2.2. Propiedades de las películas bioplásticas

Para que las películas a base de biopolímeros sustituyan a los polímeros sintéticos en la industria alimentaria, es necesario que posean características específicas, que les permitan proteger a los alimentos con los que están en contacto y así, competir a nivel funcional contra los empaques tradicionales (Ribeiro et al., 2021). Las películas de almidón se caracterizan por sus deficientes propiedades mecánicas y débiles propiedades de barrera (Wang et al., 2020); que, a su vez forman parte de las problemáticas que giran en torno a su escalamiento industrial.

Gooch (2011), define a las propiedades mecánicas, como aquellas que se asocian a la elasticidad, frente a la aplicación de una fuerza. En las películas, la evaluación de estas propiedades permite conocer su comportamiento ante la manipulación, el almacenamiento y las condiciones ambientales a las que se enfrentará el material (Murrieta-Martínez et al., 2018). Para conocer el comportamiento mecánico de las películas de almidón, se sugiere se realicen una serie de pruebas (Tabla 1) (Cecchi & De Carolis, 2021).

Por otro lado, las propiedades de barrera permiten establecer un obstáculo biológico o químico, entre la velocidad de los procesos moleculares de degradación, propios de los alimentos y agentes permeables en el ambiente, principalmente vapor de agua y oxígeno (Murrieta-Martínez et al., 2018). Abdan et al. (2020) indican que, para que un líquido o gas permee en la película, es necesario se lleven a cabo 4 procesos: *absorción* de las moléculas permeables en la superficie de la película, *solubilidad* de ellas una vez adsorbidas, *difusión* de las moléculas permeables sobre la superficie en un gradiente de concentración y la *desorción* desde la superficie hacia el exterior.

Tabla 1: Pruebas más utilizadas para la evaluación de las propiedades mecánicas, de películas a base de biomasa. Elaboración propia con datos de Cecchi & De Carolis, (2021).

Propiedades mecánicas	
Prueba	Evaluación
Tracción	Resistencia a la tracción, elongación y módulo de elasticidad
Dureza	Efectos estéticos adversos de la superficie desgastada o rayada
Resistencia al desgarre	Fuerza por unidad de espesor necesaria para provocar un desgarro
Flexibilidad	Punto de ruptura o de deformación máxima del 5%, según lo primero que suceda
Resistencia al impacto	Energía necesaria para generar rompimiento
Densidad	Masa por unidad de volumen de la película
Compresión	Deformación y la resistencia de compresión, bajo presión de trituración
Fluencia	Deformación lenta (extensión o compresión) durante un lapso de tiempo específico
Debilidad	Debilitamiento por uso continuo
Fricción	Resistencia estática y cinética al contacto con otra superficie
Desgaste	Perdida de volumen de la película

Las interacciones entre las moléculas gaseosas y el material de empaque, afectan la vida útil del alimento, al modificar su textura, disminuir su turgencia y la calidad nutricional, además de alterar el peso comercial (Parreidt et al., 2019). La calidad de estas propiedades, dependen de la morfología de la película, su cristalinidad, espesor, aditivos utilizados, así como de las características del material de fabricación empleado, demostrando que, la caracterización físico-química, también es importante de analizar (Tabla 2) (Cecchi & De Carolis, 2021).

Las películas con menor permeabilidad poseen mejores propiedades de barrera (Abdan et al., 2020). No obstante, las películas de almidón tienen una alta permeabilidad al vapor de agua, asociada a la cantidad de amilosa presente, provocando el agrupamiento de agua a través de micro cavidades de la película al igual que la presencia de altos contenidos de plastificantes (Rendón-Villalobos et al., 2017).

Por lo que es necesario vigilar de manera rigurosa las propiedades de barrera en función del alimento en que se aplicarán (Ribeiro et al., 2021). Para ello, su evaluación requiere determinar la solubilidad, absorción y desorción de

agua, espesor, microestructura, cristalinidad, comportamiento térmico y permeabilidad al vapor de agua (WVP, por sus siglas en inglés; Rendón-Villalobos et al., 2017; Ayquipa-Cuellar et al., 2021).

Tabla 2: Técnicas de análisis más utilizadas para la caracterización físico-química, de películas a base de biomasa. Elaboración propia con datos de Cecchi & De Carolis (2021).

Caracterización físico-química	
Característica	Técnica de análisis
Morfología	Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)
Cristalinidad y estabilidad térmica	Calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) y análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés)
Naturaleza química (grado de polimerización)	Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

Debido a que las películas de almidón poseen propiedades mecánicas y de barrera débiles, se han realizado investigaciones en torno a desarrollar tratamientos (Liu et al., 2020), que pretenden modificar estas características, mismos que se discuten en una sección posterior.

Es más que clara la limitada aplicación de las películas de almidón, dadas sus propiedades mecánicas y de barrera, mismas que se deben a su alta afinidad al agua, lo que resulta en la producción de películas incomparables con los plásticos tradicionales (Cruz-Gálvez et al., 2018; Nandi & Guha, 2018); sin embargo, la medición de todas estas propiedades tiene el fin de garantizar la seguridad alimentaria para al cumplimiento de las reglamentaciones correspondientes (Cecchi & De Carolis, 2021).

### 3. Películas de almidón de papa

El registro del uso de almidón para la fabricación de películas, data de 1920; no obstante, como se mencionó anteriormente, ha demostrado tener dificultades de aplicación dadas sus propiedades mecánicas, representado una gran limitante (Mohammadi-Nafchi et al., 2013).

Estas limitantes, están relacionadas con la presencia de enlaces de hidrogeno, la cristalización de los polisacáridos y la cantidad de amilosa y amilopectina presente, que dependerá del tipo de almidón utilizado (Liu et al., 2020b).

Por ello, a través de los años se han generado una serie de investigaciones, que no solo buscan mejorar la estabilidad de las propiedades mecánicas, con el fin de ampliar su uso en distintos alimentos, sino también conservar la inocuidad y alargar el tiempo de vida del alimento.

#### 3.1. Últimas innovaciones

En los últimos 5 años, se han generado diversas investigaciones que proponen al almidón de papa como una fuente accesible y de fácil extracción para producir películas biodegradables. Las investigaciones buscan modificar la estructura del almidón para mejorar las propiedades mecánicas y de barrera de las películas, permitiendo la seguridad alimentaria.

Fonseca et al. (2018), modificaron la estructura del almidón de *Solanum tuberosum L.* (papa), con hipoclorito de sodio (NaClO) como agente oxidante, con el fin de despolimerizar la cadena y reducir su peso molecular; además agregaron sorbitol y glicerol como plastificantes para facilitar la formación de películas. Con ello, demostraron que la oxidación del almidón es una técnica que permite obtener películas con propiedades de barrera deseables, potenciándose aún más con la adición de sorbitol que con el glicerol; no obstante, también demostraron que, con el uso de almidón oxidado y bajas concentraciones de los plastificantes, se obtienen películas rígidas y dúctiles. Por lo que, han sugerido que las películas obtenidas son biodegradables y adecuadas para su uso en el empaquetado de alimentos, sin hacer referencia al tipo de alimento.

Domene-López et al. (2019), al igual que Fonseca et al. (2018), consideran que un plastificante adecuado, debe ser compatible con el almidón y tener alta estabilidad térmica, no ser volátil y tóxico. Y aunque ambos reconocen al glicerol como un buen plastificante, Domene-López et al. (2019) proponen por primera vez el acetato de 1-etil-3-metilimidazolio, como líquido iónico plastificante en películas de almidón de papa, debido a que cumple con las características necesarias, además de reportes previos que identifican actividad del ion acetato durante el proceso de gelatinización similar al glicerol.

A diferencia de Fonseca et al. (2018), Domene-López et al. (2019), obtuvieron películas amorfas y transparentes. Durante la investigación, los autores han identificado que el contenido molecular del almidón, como amilosa y monoésteres de fosfato principalmente, impactan en las propiedades físicas y mecánicas de la película, al interactuar con el ion acetato, incrementando su peso molecular, causando que durante la elaboración de la solución filmógena, en la cristalinización, disminuye la cristalinidad de los granulos de almidón. No obstante, ambos autores realizan una microscopía electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), con el fin de identificar la calidad microestructural de las películas. Domene-López et al. (2019), obtienen micrografías que revelan películas altamente homogéneas, sin poros o grietas, siendo una señal de que la incorporación de acetato de 1-etil-3-metilimidazolio como plastificante, permite que el granulo de almidón gelatinice lo suficiente para la obtención de películas, mientras que Fonseca et al. (2018) a través de la micrografía, reconocen películas de estructuras compactas, lisas y sin poros, no obstante; identifican que las películas poseen mayor homogeneidad a mayor grado de oxidación, debido a que proceso permite disminuir los granulos parcialmente gelatinizados.

Por otro lado, Zhang et al. (2018), reconocen que las películas de almidón de papa complementadas con nanocompuestos, pueden poseer mejores propiedades mecánicas y con mayor permeabilidad. Al igual que Zhang et al. (2018), Yang et al. (2018) y Mujeeb-Rahman et al. (2018), han evaluado al nano dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y óxido de zinc (ZnO) respectivamente, como posibles nanocompuestos en la formación de películas, para utilizarse en el empaquetado de *Agaricus bisporus* (champiñón blanco). Aunque, la conservación del champiñón fue efectiva con las películas obtenidas, han reportado citotoxicidad y una baja calidad de la película asociada al tamaño de las nano partículas, no obstante, han identificado actividad antibacteriana contra *Escherichia coli* y en menor medida contra *Staphylococcus aureus*.

Yang et al. (2018), demostraron que uno de los efectos más importantes asociados a la incorporación del 6% en peso de nano SiO<sub>2</sub>, es el incremento de resistencia a la tracción en las películas, esto en comparación de películas en las que no se utiliza, con un máximo de hasta 49.8±2.15% MPa, y 15% MPa respectivamente. Esto se debe a las interacciones interfaciales entre las nanopartículas y las moléculas del almidón en conjunto con el plastificante (alcohol polivinílico, en este caso). Zhang et al. (2018), hacen referencia, que este efecto sucede gracias a la estabilización del almidón con los óxidos de silicio; sin embargo, Yang et al. (2018), enfatizan en la importancia de incorporar nanopartículas de SiO<sub>2</sub> de 100 nm, ya que es el tamaño adecuado en el que se adsorben en su totalidad una vez incorporados en la matriz filmógena. Este efecto fue similar en el estudio de Mujeeb-Rahman et al. (2018). Así mismo, al medir la permeabilidad de vapor de agua (WVP, por sus siglas en inglés), que representa el transporte de humedad a través de la película con el fin de conocer si son capaces de mantener la calidad de alimentos ante la adsorción y desorción de agua de los mismos. Los autores evidenciaron los cambios efectuados en las películas por las nanopartículas, Zhang et al. (2018), identificaron que la WVP de las películas, disminuye con relación al aumento del tamaño de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>, asociado a la posibilidad de generar micro vacíos, siendo 100 nm donde se encuentra la WVP más bajo. De igual forma Yang et al. (2018), obtienen valores bajos de WVP, sin embargo, lo asocian con la cantidad de alcohol polivinílico y glicerol utilizados, que generan una fuerte interacción de los enlaces de hidrógeno y la interacción electrostática.

Nandi & Guha (2018), incorporaron otros carbohidratos para el mejoramiento de películas de almidón; por lo que proponen añadir goma guar, por su amplio uso como endurecedor, además, sugieren considerar las proporciones adecuadas, entre almidón, goma guar y glicerol como plastificante. Con el experimento se demostró que, la adición de goma guar, mejoró la resistencia a la tracción, pero no las propiedades de barrera al vapor de agua, abriendo paso a la posibilidad de ser necesario el uso de aditivos u otro tipo de plastificantes para obtener películas con propiedades mecánicas y de barrera deseables. Por otro lado, Wu et al. (2019), investigaron la incorporación de otro polisacárido con el almidón, a través de la reticulación como método innovador, para la formación de películas con una menor sensibilidad al agua. En la investigación, han utilizado ácido cítrico como agente de reticulación, en películas de almidón y quitosano, que, al compararlas con películas no reticuladas, demostraron tener mejores propiedades mecánicas y antimicrobianas para su uso como empaques de alimentos.

En 2018, Cruz-Gálvez et al. propusieron utilizar películas de almidón con glicerol como plastificante, adicionadas con extracto metanólico y acetónico de *Hibiscus sabdariffa* (jamaica), por su actividad antimicrobiana y antioxidante previamente reportada; las películas fabricadas las destinaron para el empaquetado de salchichas. El uso del extracto metanólico de jamaica, disminuyó la permeabilidad de agua y las propiedades mecánicas de la película, aunque el extracto acetónico, reportó actividad antimicrobiana contra *Listeria monocytogenes*. La información es consistente con la investigación de Gómez-Aldapa et al. (2021), en donde tras, la formulación de almidón de papa, con glicerol y extracto de *Hibiscus sabdariffa* como sustituyente de agua destilada,

obtuvieron películas con mayor capacidad de barrera al vapor y actividad antimicrobiana contra *E. coli*, *L. monocytogenes* y *S. aureus*. En esta última investigación proponen el uso de estas películas como material de empaquetado de alimentos, sin especificar el tipo.

De este modo, se ha comprobado que, los compuestos fenólicos de algunos extractos naturales, pueden actuar como barreras de luz ultravioleta, que pueden ser utilizados en películas activas para empaquetado de productos fotosensibles (Piñeros-Hernandez et al., 2017).

Por ello, López-Córdoba et al. (2019), crearon fibras de alcohol polivinílico (PVA) electro hiladas, como capa central de las películas resistentes al agua por el entrecruzamiento con ácido cítrico e incorporan los polifenoles de *Ilex paraguariensis* (yaerba mate) a las películas de almidón de papa, como aditivo antioxidante y potenciador de la biodegradabilidad.

Los autores identificaron la mejora de las propiedades mecánicas de la película, sin el uso de agentes compatibilizadores, por lo que se propone utilizar las fibras electro hiladas de PVA, para el reforzamiento de películas de almidón de papa y ampliar su uso como empaques activos, reconocidos así por su actividad antimicrobiana y antioxidante que mejoran la vida útil de un alimento (Valdés et al., 2014).

Así mismo, Menzel (2020), también propuso utilizar fibras para reforzar las películas de almidón, en este caso de celulosa y ácido cítrico, como agente plastificante y de reticulación, además de ser adicionadas con extractos antioxidantes de cascara de semilla de girasol, probando el método de fusión y moldeo por compresión para la obtención final del material. Aunque los resultados coinciden con lo obtenido por López-Córdoba et al. (2019); Menzel (2020), sugiere el uso de las películas para la protección de nueces y cereales para evitar la oxidación de los lípidos.

Lo propone así debido a las propiedades de barrera de las películas resultantes, López-Córdoba et al. (2019), identificaron que el uso de fibras electro hiladas de PVA es una opción para mejorar la adherencia interfacial entre el PVA y el almidón, en comparación de películas elaboradas a partir de PVA sin tratamiento previo, ya que mejora el sistema de relleno de la película. Además, el uso de polifenoles de yerba mate, demostró mejorar las propiedades de barrera a la luz, al obtener una mayor reducción porcentual de la transmisión de luz, ya que actúan como captadores de luz (Piñeros-Hernandez et al., 2017).

Se esperaría que el uso de fibras de celulosa, al igual que las fibras electro hiladas de PVA, mejoraran considerablemente las propiedades de barrera, no obstante, Menzel (2020) reconoce que con su adición se obtienen resultados similares a los de películas formuladas solo con almidón y glicerol. Sin embargo, Menzel (2020), concuerda con Olsson et al., (2013), quienes reconocen que la WVP mejora considerablemente con ácido cítrico durante su incorporación en la solución filmógena al funcionar como agente reticulante.

Además, Menzel (2020), también identifica que el método de fabricación interviene considerablemente en la mejora de las propiedades de la película, debido a la posible interacción de enlaces éster y enlaces cruzados con el almidón durante la elaboración de la solución filmógena, que provoca hinchazón de la película en agua, efecto que controlaron con el ácido

cítrico pese a que el uso del antioxidante también demostró causar hinchazón.

Así mismo, Hilmi & Zanuri, (2019) y Gómez-Aldapa et al. (2020b), coinciden con López-Córdoba et al. (2019), al comprobar que el PVA, además de ser un excelente reforzador de las películas por mejorar las propiedades mecánicas, posee una capacidad de biodegradación alta en conjunción con el almidón; que al utilizarlo en conjunto disminuye costos de fabricación y mejora la biodegradación de la película.

En 2019, Wang et al., combinan la desramificación de amilosa con pululanasa utilizando el tratamiento ultrasónico y calentamiento con dimetilsulfóxido, para la formación de complejos de almidón con ácido láurico, en la fabricación de películas. Demuestran que, con la desramificación de amilosa a través de esta enzima, se obtienen películas con mejores propiedades mecánicas y de barrera contra la humedad; sin embargo, no mencionan su aplicación en algún tipo de alimento.

Liu et al. (2020b) por otro lado, prefirieron analizar la actividad del pululano en las propiedades mecánicas de las películas de almidón, demostrando que la adición de este polisacárido mejora la resistencia de las películas compuestas. El pulunano, disminuyó la resistencia a la tracción de las películas por la disminución de la formación de enlaces de hidrogeno. Esto se debe a que el pulunano actúa en la evolución de conformación de la red polimérica, incrementando la flexibilidad de las cadenas moléculas, permitiendo que la película se forme con una red tridimensional estable. Los resultados se pueden comparar con lo obtenido por Wang et al. (2019), quienes al realizar un análisis de las propiedades mecánicas con respecto al tiempo de desramificación, demuestran que la resistencia a la tracción aumenta conforme incrementa el tiempo de tratamiento, esta reacción se refleja al obtener películas de redes poliméricas resistentes. Así mismo, al evaluar la permeabilidad de las películas, ambos autores coinciden en que tanto la desramificación de amilosa con pululanasa, así como el uso de pululano mejoran la WVP, al no demostrar diferencias estadísticamente significativas entre sí, no obstante, con la lectura de isotermas, se refleja que la distribución de poros sobre la película, puede estar relacionado con la retención de humedad, de modo que, a menor uniformidad, mayor humedad. Por ello, las películas de Wang et al. (2019), poseen menor retención de humedad, gracias al uso de ácido láurico al permitir formar películas compactas de superficie uniforme, al ser comparadas por las realizadas por Liu et al. (2020b).

Por otro lado, en la búsqueda de extender el tiempo de vida e inocuidad de la carne refrigerada por hasta 8 días, Yuan et al. (2021), han diseñado películas compuestas de almidón de papa, que a diferencia de lo propuesto por Zhang et al. (2018), Yang et al. (2018) y Mujeeb-Rahman et al. (2018), estas fueron adicionadas con emulsiones de nanopartículas de aceite de tomillo, demostrando su efectividad antimicrobiana contra *E. coli* y *S. aureus*.

Yuan et al. (2021), también aseguran que las películas no son tóxicas, son comestibles y biodegradables, capaces de mantener durante largo tiempo la carne fresca en refrigeración. Esto se debe a que se logró una liberación sostenida de la actividad antimicrobiana en la carne, gracias a la baja compatibilidad entre el aceite de tomillo y la película de almidón; no obstante, autores como Jafarzadeh et al., (2020) aseguran que bastan pequeñas gotas de aceite esencial en la

solución filmógena para originar que la película se áspera o discontinua de propiedades funcionales inferiores, asociado a la presencia de compuestos fenólicos no polares.

Las nanopartículas permiten incorporar el aceite esencial con alto grado de compatibilidad, logrado una liberación paulatina. Por otra parte, los resultados obtenidos por los autores también se asocian en gran medida, a la adición del aceite de tomillo, que tuvo la capacidad de ralentizar la degradación de proteínas causada por los microorganismos.

Los resultados son similares a lo obtenido por Farajpour et al. (2020), quienes diseñaron películas de almidón de papa completamente comestibles, en las que incorporaron aceite de oliva para mejorar las propiedades de barrera, además de aprovechar la presencia de tocoferoles y fenoles del aceite como antioxidantes, para la protección del alimento contra luz ultravioleta; también, utilizaron nanopartículas de zeína con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del almidón.

De este modo, el estudio permitió conocer que la incorporación de aceite de oliva disminuye las propiedades mecánicas y de barrera, aunque, utilizar nanopartículas de zeína contrarresta este efecto; variables que Yuan et al. (2021) no han considerado previamente en relación a la incorporación de aceite, o bien, por Zhang et al. (2018), Yang et al. (2018) y Mujeeb-Rahman et al. (2018) debido al uso de nanopartículas, dejando una serie de incertidumbres, sobre el modo de acción de estas como reforzadoras de las películas durante la preparación de la solución filmógena, ya sea por su interacción por el tamaño de la nanopartícula, las condiciones de empleo de adición, así como el compuesto en cuestión.

Xin et al. (2020) por otro lado, generaron películas de almidón, zeína y CUR (polifenol natural, resultado de la desacetilación del quitosano), para prologar el tiempo de vida en anaquel de filetes de *Schizothorax prenanti*, en el estudio se identificó la protección antimicrobiana, química y sensorial del filete con el uso de las películas, por lo que sugieren su uso como empaques activos para este tipo de carnes.

Xin et al. (2020) y Sani et al. (2021) obtienen resultados similares, sin embargo; estos últimos, lograron extender el tiempo de vida útil de la carne de codorniz, utilizando películas activas elaboradas con almidón de papa, pectina de manzana como agente estabilizador y adicionada con aceite esencial microencapsulado de *Zataria multiflora* como agente antioxidante y antimicrobiano, además de óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ), debido a su alta dureza y resistencia a la abrasión, así como por sus propiedades antimicrobianas.

Merino et al. (2021), propone reincorporar a la economía los desechos de papa para generar bioplásticos, generando una economía circular. En su estudio, utilizaron cascara de papa como fuente de almidón hidrolizado, obtenido a través de hidrólisis ácida suave y poliglicerol-3 como plastificante. Con ello, obtuvieron películas con buenas propiedades mecánicas y de barrera, siendo de fácil desintegración en agua, por lo que a diferencia de Cruz-Gálvez et al. (2018), Zhang et al. (2018), Xin et al. (2020) y Sani et al. (2021); Merino et al. (2021) sugiere su aplicación únicamente en alimentos secos como pastas y arroz, ya que las propiedades mecánicas y de barrera son distintas.

Estas diferencias se asocian a la combinación entre la hidrólisis ácida suave y el uso de poliglicerol-3, que permitió obtener películas homogéneas, transparentes, sin tensiones internas, mismas que observaron a través de micrografías por SEM, en donde confirmaron que con el 30% m/m de almidón

en combinación con la hidrólisis, se pueden presentar microfisuras, generalmente asociadas a la separación de fases provocado por un exceso de plastificante. Por ello, se deberá considerar seriamente el uso de plastificante, ya que también en insuficiente podría generar grietas y dificultar la protección de los alimentos.

En un estudio con un propósito similar al de Merino et al. (2021); Gonçalves et al. (2020), proponen diseñar películas a partir de almidón recuperado de lodos del lavado de papa, añadiendo ceras y aceites de subproductos recuperados de la producción de papas fritas. Con su estudio, se demostró que estos precursores pueden ser competitivos para la obtención de bioplásticos, al obtener las películas con mayor rugosidad y flexibilidad, en comparación a las películas elaboradas únicamente con almidón de papa. Sin embargo, no reporta la toxicidad de la película y su uso en el empaquetado de algún alimento.

Oliveira et al. (2020), al igual que Gonçalves et al. (2020), también proponen utilizar almidón obtenido a partir de los lodos del lavado de papa, para combinarlo con extractos de la piel plateada de café (tegumento del endospermo de la semilla del café); que, al tener celulosa, compuestos antioxidantes e hidrofóbicos, lo utilizan como plastificante antioxidante. De este modo Oliveira et al. (2020), obtienen películas con propiedades mecánicas mejoradas, por lo que sugieren su uso como material de empaque activo de alimentos, aunque tampoco reporta toxicidad de la película.

#### 4. Panorama futuro

Muchas de las investigaciones desarrolladas por la industria alimentaria están centradas en encontrar nuevos bioplásticos capaces de proteger a los alimentos que garanticen la seguridad alimentaria, mismas que se asocian a las investigaciones que buscan dar solución al incremento del uso de plásticos derivados del petróleo. Para lograrlo, es necesario continuar desarrollando estudios para mejorar las propiedades funcionales de las películas a base de almidón, a través de métodos novedosos y sustentables (Zhang et al., 2018). Con ello, se dará la pauta para diversificar sus usos y así, incorporarlas en una amplia cadena productiva (Fonseca et al., 2018), en la que se busca la protección de diversos alimentos con diferentes características y necesidades de oxígeno, luz, agua, temperatura, agentes biológicos y daños físicos, simultáneamente (Gómez-Aldapa et al., 2021).

El uso de biopolímeros como alternativa a los polímeros sintéticos, está creciendo con rapidez, lo que también ha generado el interés social entorno a la sostenibilidad ambiental de su uso. Por lo que, es importante ampliar las investigaciones en ecología, agricultura, materiales, alimentación y ciencia ambiental (Tan et al., 2021b), enfocadas en asegurar la rentabilidad de la producción de papa, para la generación actual y futura de bioplásticos (Kabir et al., 2020).

Por otro lado, pese al uso de papa como precursor del almidón, en conjunto con algunos aditivos y plastificantes, se encuentran regulados por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés), por la Autoridad de Normas y Seguridad Alimentaria de la India (FSSAI, por siglas en inglés) y por el Código alimentario (Codex alimentarius) (Poonia & Dhewa, 2022). Su uso ha traído consigo preocupaciones dada la actual crisis alimentaria, pese a que cada año se desperdicia el 45% de cultivos de papa,

entre frutas y hortalizas, ya que, durante su procesamiento, se pelan y se generan toneladas de cascara aún ricas en almidón, celulosa y proteínas, todas de valor cero, que pueden reintroducirse a la cadena de producción para la generación de una economía circular (Ayquipa-Cuellar et al., 2021; Merino et al., 2021).

Otra de las interrogativas que se han generado en torno al uso de papa como precursor de películas bioplásticas, giran en torno al uso de almidones de especies genéticamente modificadas, debido a la probable presencia de alérgenos, toxinas o anti nutrientes que pudieran afectar la inocuidad del alimento. En materia de seguridad alimentaria, también son importantes los procesos post producción, por ello, realizar mayores esfuerzos en el manejo de las películas fabricadas después de su uso, también es un tema importante a considerar (Kabir et al., 2020b).

Por ello, para que las películas de almidón de papa sean consideradas como una posible solución a los plásticos tradicionales, en materia de seguridad alimentaria, es necesario considerar ampliar las investigaciones donde se evalué su impacto ambiental. Similar a lo que realiza Fetner & Miller (2021), quienes evaluaron el ciclo de vida asociado al potencial de calentamiento global, el consumo de agua y el uso de energía primaria no renovable, de las alternativas reutilizables de utensilios de cocina hechos a base de biopolímeros. Según los datos recuperados de las investigaciones de Dinkel et al. (1996); Kim & Dale (2005); Madival et al. (2009) y Tecchio et al. (2016), revelan que en el ciclo de vida del almidón, en comparación con el de otros polímeros sintéticos, las películas de almidón, tienen menos impacto en la emisión de gases de efecto invernadero, representando un alto potencial de ahorro de plástico con menor requerimiento energético para su fabricación. Sin embargo, al compararse con otros biopolímeros, como el ácido poliláctico o los polihidroxi alcanoatos, es el almidón quien más riesgo representa. Por eso la fabricación de películas de con este biopolímero, deberán realizarse bajo los riesgos ambientales que su uso representa. No obstante, su uso representa una reducción considerable del uso de empaques plásticos utilizados por la industria alimentaria, a un menor coste ambiental y económico.

Es así que Kabir et al. (2020), afirman que la seguridad alimentaria debe garantizar que en la implantación de películas de almidón, a partir de papa, se obtengan precursores en un aumento sostenible, así como garantizar y asegurar la calidad de los procesos que se están desarrollando, para contribuir en extender el tiempo de vida útil de los alimentos, sin la necesidad de disputar la disponibilidad de alimentos y que así, a largo plazo, se logre sustituir satisfactoriamente a los plásticos tradicionales.

Sin duda, a partir del continuo crecimiento poblacional, en los próximos años se requerirá satisfacer la demanda alimentaria, que a su vez causará el incremento de desechos de materiales de biomasa ricos en almidón, como lo es la papa. Recuperar estos biopolímeros, será uno de los principales retos en materia de seguridad alimentaria durante los siguientes años. Así mismo, este reto, obligará a las industrias a generar bioplásticos en torno a una economía circular, que tiene como principio, la reducción del desperdicio de alimentos y la mitigación del impacto ambiental, al reducir los materiales plásticos tradicionales. De este modo se espera que, en los próximos años, la generación de bioplásticos a partir de

almidón, se alinee a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (Menzel, 2020).

## 5. Referencias

- Abdan, K. B., Yong, S. C., Chiang, E. C. W., Talib, R. A., Hui, T. C., & Hao, L. C. (2020). Barrier properties, antimicrobial and antifungal activities of chitin and chitosan-based IPNs, gels, blends, composites, and nanocomposites. In *Handbook of Chitin and Chitosan: Volume 2: Composites and Nanocomposites from Chitin and Chitosan, Manufacturing and Characterisations* (Vol. 2, pp. 175–227). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817968-0.00006-8>
- Alizadeh-Sani, M., Mohammadian, E., Rhim, J. W., & Jafari, S. M. (2020). pH-sensitive (halochromic) smart packaging films based on natural food colorants for the monitoring of food quality and safety. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 105, pp. 93–144). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.014>
- Ayquipa-Cuellar, E., Salcedo-Sucasaca, L., Azamar-Barrios, J. A., & Chaquilla-Quilca, G. (2021). Assessment of Prickly Pear Peel Mucilage and Potato Husk Starch for Edible Films Production for Food Packaging Industries. *Waste and Biomass Valorization*, 12(1), 321–331. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00981-y>
- Barbosa-Cánovas, G. v, Board, A., Hartel, R. W., & McCarthy, M. (2014). *Food Engineering Series Series Editor* (eBook). Springer. <http://www.springer.com/series/5996>
- Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 385–401. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.09.015>
- Blackburn, K., & Green, D. (2021). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*, 51(3), 518–530. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01589-9>
- Brigham, C. (2018). Biopolymers: Biodegradable Alternatives to Traditional Plastics. *Green Chemistry: An Inclusive Approach*, 753–770. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00027-3>
- Cecchi, T., & de Carolis, C. (2021). *Biobased Products from Food Sector Waste*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-63436-0>
- Chen, Y., Awasthi, A. K., Wei, F., Tan, Q., & Li, J. (2021). Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. *Science of the Total Environment*, 752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>
- Cruz-Gálvez, A. M., Castro-Rosas, J., Rodríguez-Marín, M. L., Cadena-Ramírez, A., Tellez-Jurado, A., Tovar-Jiménez, X., Chavez-Urbiola, E. A., Abreu-Corona, A., & Gómez-Aldapa, C. A. (2018a). Antimicrobial activity and physicochemical characterization of a potato starch-based film containing acetic and methanolic extracts of *Hibiscus sabdariffa* for use in sausage. *LWT*, 93, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.064>
- Cruz-Gálvez, A. M., Castro-Rosas, J., Rodríguez-Marín, M. L., Cadena-Ramírez, A., Tellez-Jurado, A., Tovar-Jiménez, X., Chavez-Urbiola, E. A., Abreu-Corona, A., & Gómez-Aldapa, C. A. (2018b). Antimicrobial activity and physicochemical characterization of a potato starch-based film containing acetic and methanolic extracts of *Hibiscus sabdariffa* for use in sausage. *LWT*, 93, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.064>
- de Pilli, T., Baiano, A., Lopriore, G., Russo, C., Giulio, ., & Cappelletti, M. (2021). *SPRINGER BRIEFS IN MOLECULAR SCIENCE CHEMISTRY OF FOODS Sustainable Innovations in Food Packaging* (In S. i. M. Science). <http://www.springer.com/series/11853>
- Dinkel, F., Pohl, C., Ros, M., & Waldeck, B. (1996). *Ökobilanz stärkehaltiger Kunststoffe (Nr. 271)* (Vol. 2). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Domene-López, D., Delgado-Marín, J. J., Martín-Gullon, I., García-Quesada, J. C., & Montalbán, M. G. (2019). Comparative study on properties of starch films obtained from potato, corn and wheat using 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate as plasticizer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 845–854. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.004>
- Farajpour, R., Emam Djomeh, Z., Moeini, S., Tavahkolipour, H., & Safayan, S. (2020). Structural and physico-mechanical properties of potato starch-olive oil edible films reinforced with zein nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, 941–950. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.175>
- Fetner, H., & Miller, S. A. (2021). Environmental payback periods of reusable alternatives to single-use plastic kitchenware products. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1521–1537. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01946-6>
- Flores, P. (2020). The issue of plastic use during the Covid-19 pandemic. *South Sustainability*, 1(2), e016–e016. <https://doi.org/10.21142/ss-0102-2020-016>
- Fonseca, L. M., Henkes, A. K., Bruni, G. P., Viana, L. A. N., de Moura, C. M., Flores, W. H., & Galio, A. F. (2018). Fabrication and Characterization of Native and Oxidized Potato Starch Biodegradable Films. *Food Biophysics*, 13(2), 163–174. <https://doi.org/10.1007/s11483-018-9522-y>
- Gautam, N., Garg, S., & Yadav, S. (2021). Underutilized finger millet crop for starch extraction, characterization, and utilization in the development of flexible thin film. *Journal of Food Science and Technology*, 58(11), 4411–4419. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04926-0>
- Goel, V., Luthra, P., Gurpreet, ., Kapur, S., & Ramakumar, . S S v. (2021). *Biodegradable/Bio-plastics: Myths and Realities*. 29, 3079–3104. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02099-1>
- Gómez-Aldapa, C. A., Díaz-Cruz, C. A., Castro-Rosas, J., Jiménez-Regalado, E. J., Velázquez, G., Gutierrez, M. C., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2021). Development of Antimicrobial Biodegradable Films Based on Corn Starch with Aqueous Extract of *Hibiscus sabdariffa* L. *Starch/Stärke*, 73(1–2). <https://doi.org/10.1002/star.202000096>
- Gómez-Aldapa, C. A., Velázquez, G., Gutierrez, M. C., Castro-Rosas, J., Jiménez-Regalado, E. J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2020). Characterization of Functional Properties of Biodegradable Films Based on Starches

- from Different Botanical Sources. *Starch/Staerke*, 72(11–12). <https://doi.org/10.1002/star.201900282>
- Gómez-Aldapa, C. A., Velazquez, G., Gutierrez, M. C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Materials Chemistry and Physics*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027>
- Gonçalves, I., Lopes, J., Barra, A., Hernández, D., Nunes, C., Kapusniak, K., Kapusniak, J., Evtyugin, D. v., Lopes da Silva, J. A., Ferreira, P., & Coimbra, M. A. (2020). Tailoring the surface properties and flexibility of starch-based films using oil and waxes recovered from potato chips byproducts. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.231>
- Gooch, J. W. (2011). Mechanical Properties. In J. W. Gooch (Ed.), *Encyclopedic Dictionary of Polymers* (p. 448). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8\\_7254](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8_7254)
- Hilmi, N. A., & Zanuri, A. Z. (2019). *ScienceDirect Physicochemical properties of biodegradable films of polyvinyl alcohol/sago starch for food packaging*. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Jafarzadeh, S., Jafari, S. M., Salehabadi, A., Nafchi, A. M., Uthaya Kumar, U. S., & Khalil, H. P. S. A. (2020). Biodegradable green packaging with antimicrobial functions based on the bioactive compounds from tropical plants and their by-products. *Trends in Food Science and Technology*, 100, 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.017>
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012). Edible and Biodegradable Starch Films: A Review. In *Food and Bioprocess Technology* (Vol. 5, Issue 6, pp. 2058–2076). <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0835-4>
- Kabir, E., Kaur, R., Lee, J., Kim, K. H., & Kwon, E. E. (2020a). Prospects of biopolymer technology as an alternative option for non-degradable plastics and sustainable management of plastic wastes. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 258). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120536>
- Kabir, E., Kaur, R., Lee, J., Kim, K. H., & Kwon, E. E. (2020b). Prospects of biopolymer technology as an alternative option for non-degradable plastics and sustainable management of plastic wastes. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 258). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120536>
- Khalil, H. P. S. A., Banerjee, A., Saurabh, C. K., Tye, Y. Y., Suriani, A. B., Mohamed, & A., Karim, A. A., Rizal, S., & Paridah, & M. T. (n.d.). *Biodegradable Films for Fruits and Vegetables Packaging Application: Preparation and Properties*. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9180-3>
- Kim, S., & Dale, B. E. (2005). Life cycle assessment study of biopolymers (Polyhydroxyalkanoates) derived from notilled corn. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(3), 200–210. <https://doi.org/10.1065/lca2004.08.171>
- Kumar, A., Singh, P., Gupta, V., & Prakash, B. (2020). Application of nanotechnology to boost the functional and preservative properties of essential oils. In *Functional and Preservative Properties of Phytochemicals* (pp. 241–267). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818593-3.00008-7>
- Kumar, P. (2018). Role of Plastics on Human Health. *The Indian Journal of Pediatrics* 2018 85:5, 85(5), 384–389. <https://doi.org/10.1007/S12098-017-2595-7>
- Kumar, P., Mahajan, P., Kaur, R., & Gautam, S. (2020). Nanotechnology and its challenges in the food sector: a review. *Materials Today Chemistry*, 17, 100332. <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2020.100332>
- Liu, L., Yang, M., Xu, J., Fan, X., Gao, W., Wang, Q., Wang, P., Xu, B., Yuan, J., Yu, Y., Wang, M., & Yuan, Y. (2020a). Exploring the role of pullulan in the process of potato starch film formation. *Carbohydrate Polymers*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115910>
- Liu, L., Yang, M., Xu, J., Fan, X., Gao, W., Wang, Q., Wang, P., Xu, B., Yuan, J., Yu, Y., Wang, M., & Yuan, Y. (2020b). Exploring the role of pullulan in the process of potato starch film formation. *Carbohydrate Polymers*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115910>
- Liu, W., Wang, Z., Liu, J., Dai, B., Hu, S., Hong, R., Xie, H., Li, Z., Chen, Y., & Zeng, G. (2020). Preparation, reinforcement and properties of thermoplastic starch film by film blowing. *Food Hydrocolloids*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106006>
- López-Córdoba, A., Estevez-Areco, S., & Goyanes, S. (2019). Potato starch-based biocomposites with enhanced thermal, mechanical and barrier properties comprising water-resistant electrospun poly (vinyl alcohol) fibers and yerba mate extract. *Carbohydrate Polymers*, 215, 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.105>
- Madival, S., Auras, R., Singh, S. P., & Narayan, R. (2009). Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*, 17(13), 1183–1194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.03.015>
- Menzel, C. (2020). Improvement of starch films for food packaging through a three-principle approach: Antioxidants, cross-linking and reinforcement. *Carbohydrate Polymers*, 250(1168828), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116828>
- Merino, D., Paul, U. C., & Athanassiou, A. (2021). Bio-based plastic films prepared from potato peels using mild acid hydrolysis followed by plasticization with a polyglycerol. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100707. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2021.100707>
- Mohammadi Nafchi, A., Moradpour, M., Saeidi, M., & Alias, A. K. (2013). Thermoplastic starches: Properties, challenges, and prospects. *Starch - Stärke*, 65(1–2), 61–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/star.201200201>
- Mujeeb Rahman, P., Abdul Mujeeb, V. M., Muraleedharan, K., & Thomas, S. K. (2018). Chitosan/nano ZnO composite films: Enhanced mechanical, antimicrobial and dielectric properties. *Arabian Journal of Chemistry*, 11(1), 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.09.008>
- Murrieta-Martínez, C. L., Soto-Valdez, H., Pacheco-Aguilar, R., Torres-Arreola, W., Rodríguez-Félix, F., & Márquez Ríos, E. (2018). Edible protein films: Sources and behavior. In *Packaging Technology and Science* (Vol.

- 31, Issue 3, pp. 113–122). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/pts.2360>
- Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 379–395. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4>
- Nandi, S., & Guha, P. (2018a). Modelling the effect of guar gum on physical, optical, barrier and mechanical properties of potato starch based composite film. *Carbohydrate Polymers*, 200, 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.028>
- Nandi, S., & Guha, P. (2018b). Modelling the effect of guar gum on physical, optical, barrier and mechanical properties of potato starch based composite film. *Carbohydrate Polymers*, 200, 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.028>
- Oliveira, G., Gonçalves, I., Barra, A., Nunes, C., Ferreira, P., & Coimbra, M. A. (2020). Coffee silverskin and starch-rich potato washing slurries as raw materials for elastic, antioxidant, and UV-protective biobased films. *Food Research International*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109733>
- Olsson, E., Hedenqvist, M. S., Johansson, C., & Järnström, L. (2013). Influence of citric acid and curing on moisture sorption, diffusion and permeability of starch films. *Carbohydrate Polymers*, 94(2), 765–772. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2013.02.006>
- Parreidt, T. S., Lindner, M., Rothkopf, I., Schmid, M., & Müller, K. (2019). The development of a uniform alginate-based coating for cantaloupe and strawberries and the characterization of water barrier properties. *Foods*, 8(203), 1–21. <https://doi.org/10.3390/foods8060203>
- Pellicer, E., Nikolic, D., Sort, J., Baró, M. D., Zivic, F., Grujovic, N., Grujic, R., & Pelemis, S. (2017). Advances in applications of industrial biomaterials. In *Advances in Applications of Industrial Biomaterials*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62767-0>
- Piñeros-Hernandez, D., Medina-Jaramillo, C., López-Córdoba, A., & Goyanes, S. (2017). Edible cassava starch films carrying rosemary antioxidant extracts for potential use as active food packaging. *Food Hydrocolloids*, 63, 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.034>
- Poonia, A., & Dhewa, T. (2022). Edible Food Packaging. In A. Poonia & T. Dhewa (Eds.), *Edible Food Packaging* (eBook). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2383-7>
- Ramos, S. G. (2021). Tecnologías para el desarrollo de biopolímeros, como una alternativa en la sustitución del plástico (PET). *Alimentos Ciencia e Ingeniería*, 28(1), 89–95.
- Rendón-Villalobos, J. R., Solorza-Feria, J., Rodríguez-González, F., & Flores-Huicochea, E. (2017). Barrier properties improvement using additives. In *Food Packaging* (pp. 465–495). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804302-8.00014-5>
- Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Preparation and Incorporation of Functional Ingredients in Edible Films and Coatings. *Food and Bioprocess Technology*, 14(2), 209–231. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02528-4>
- Runnels, C. M., Lanier, K. A., Williams, J. K., Bowman, J. C., Petrov, A. S., Hud, N. v., & Williams, L. D. (2018). Folding, Assembly, and Persistence: The Essential Nature and Origins of Biopolymers. *Journal of Molecular Evolution*, 86(9), 598–610. <https://doi.org/10.1007/s00239-018-9876-2>
- Sani, I. K., Geshlaghi, S. P., Pirsá, S., & Asdagh, A. (2021). Composite film based on potato starch/apple peel pectin/ZrO<sub>2</sub> nanoparticles/ microencapsulated Zataria multiflora essential oil; investigation of physicochemical properties and use in quail meat packaging. *Food Hydrocolloids*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106719>
- Tan, J., Tiwari, S. K., & Ramakrishna, S. (2021). Single-Use Plastics in the Food Services Industry: Can It Be Sustainable? *Materials Circular Economy* 2021 3:1, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S42824-021-00019-1>
- Tan, W., Cui, D., & Xi, B. (2021). Moving policy and regulation forward for single-use plastic alternatives. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 2021 15:3, 15(3), 1–4. <https://doi.org/10.1007/S11783-021-1423-5>
- Tecchio, P., Freni, P., de Benedetti, B., & Fenouillot, F. (2016). Ex-ante Life Cycle Assessment approach developed for a case study on bio-based polybutylene succinate. *Journal of Cleaner Production*, 112, 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.090>
- Vaclavik, V. A., & Christian, E. W. (2014). *Food Science Text Series Essentials of Food Science*. <http://www.springer.com/series/5999>
- Valdés, A., Mellinas, A. C., Ramos, M., Garrigós, M. C., & Jiménez, A. (2014). Natural additives and agricultural wastes in biopolymer formulations for food packaging. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 2, Issue FEB). Frontiers Media S. A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2014.00006>
- Valero-Valdivieso, M. F., Ortegón, Y., & Uscategui, Y. (2013). Biopolymers: progress and prospects. *DYNA: Revista de La Facultad de Minas*, 80(181), 171–180.
- Wang, R., Liu, P., Cui, B., Kang, X., & Yu, B. (2019). Effects of different treatment methods on properties of potato starch-lauric acid complex and potato starch-based films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.207>
- Wang, R., Liu, P., Cui, B., Kang, X., Yu, B., Qiu, L., & Sun, C. (2020). Effects of pullulanase debranching on the properties of potato starch-lauric acid complex and potato starch-based film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 1330–1336. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.173>
- Wesolowski, R. A., Wesolowski, A. P., & Petrova, R. S. (2020). The World of Materials. In *The World of Materials*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-17847-5>
- Wu, H., Lei, Y., Lu, J., Zhu, R., Xiao, D., Jiao, C., Xia, R., Zhang, Z., Shen, G., Liu, Y., Li, S., & Li, M. (2019). Effect of citric acid induced crosslinking on the structure and properties of potato starch/chitosan composite films.

- Food Hydrocolloids*, *97*.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105208>
- Xin, S., Xiao, L., Dong, X., Li, X., Wang, Y., Hu, X., Sameen, D. E., Qin, W., & Zhu, B. (2020). Preparation of chitosan/curcumin nanoparticles based zein and potato starch composite films for *Schizothorax prenati* fillet preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, *164*, 211–221.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.082>
- Yang, M., Shi, J., & Xia, Y. (2018). Effect of SiO<sub>2</sub>, PVA and glycerol concentrations on chemical and mechanical properties of alginate-based films. *International Journal of Biological Macromolecules*, *107*, 2686–2694.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.162>
- Yuan, L., Feng, W., Zhang, Z., Peng, Y., Xiao, Y., & Chen, J. (2021). Effect of potato starch-based antibacterial composite films with thyme oil microemulsion or microcapsule on shelf life of chilled meat. *LWT*, *139*.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110462>
- Zhang, R., Wang, X., & Cheng, M. (2018). Preparation and characterization of potato starch film with various size of Nano-SiO<sub>2</sub>. *Polymers*, *10*(10).  
<https://doi.org/10.3390/POLYM10101172>