



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de Grado en

Ciencia y Tecnología de los alimentos

Uso de envases biodegradables en la industria alimentaria

Use of biodegradable packaging in the food industry

Autor/es

Miguel Ángel Laborda Blanc

Director/es

Antonio Monzón Bescos
Eva María Romeo Salazar

Facultad de Veterinaria

2022

ÍNDICE:

1. Resumen / Abstract.....	3
2. Introducción.....	4
2.1. Envasado de alimentos.....	4
2.2. Impacto medioambiental y económico.....	5
2.3. Envases biodegradables.....	7
3. Justificación y objetivos.....	8
4. Metodología.....	9
5. Resultados y discusión.....	10
5.1. Materiales biodegradables en el envasado alimentario.....	10
5.1.1. Materiales extraídos de biomasa.....	12
5.1.2. Materiales sintetizados a partir de monómeros.....	19
5.1.3. Materiales producidos por acción microbiana.....	23
5.2. Tendencias en la investigación de nuevos envases biodegradables.....	26
5.2.1. Bionanocompuestos.....	26
5.2.2. Envases comestibles.....	28
5.3. Regulación en el tratamiento de materiales para la confección de nuevos envases.....	30
5.4. Desarrollo de protocolos de selección de envases en base a su adecuación.....	32
6. Conclusiones / Conclusions.....	34
7. Valoración personal.....	35
8. Bibliografía.....	35

1. RESUMEN / ABSTRACT

La industria agroalimentaria es uno de los principales consumidores de materiales destinados a la confección de envases y embalajes. El sistema de fabricación actual está cimentado sobre la producción de plástico diseñado para contener y proteger los alimentos. La realidad ya no necesita de estudios e investigaciones que confirmen el impacto negativo que estos plásticos producen en el medio ambiente, la salud pública y la calidad de los productos. Además, aunque el proceso de síntesis y producción de plásticos y envases está totalmente estandarizado, supone un coste desorbitado que debe reducirse para aliviar la situación económica mundial. Una posible solución a los efectos medioambientales y económicos que produce este sector, es el desarrollo de materiales de envasado y embalaje biodegradables, que permitan el aprovechamiento de residuos generados en diferentes ámbitos y sean sostenibles o más respetuosos con el medio ambiente.

El objetivo de este estudio es recopilar información bibliográfica acerca del estado del arte de los envases biodegradables, los materiales de los que se componen, su síntesis y modo de obtención, así como sus propiedades y posibles aplicaciones. También se pretende identificar las nuevas tendencias que marcan la dirección de la investigación de nuevos envases alimentarios biodegradables o compostables. Así como definir el marco legal que regula el tratamiento de dichos materiales, y desarrollar un protocolo de selección de los materiales en función de sus propiedades, para su uso en la industria alimentaria. Este objetivo se aborda mediante una búsqueda bibliográfica basada en el rigor científico, a través de la investigación en diversas bases de datos, revistas y artículos científicos.

Los resultados obtenidos generan controversia acerca del tema abordado. Por un lado, hay evidencias de que, los envases biodegradables existentes, pueden ser una alternativa a muchos de los envases y embalajes elaborados a partir de plástico que se encuentran en el mercado. Sin embargo, la dificultad de pasar de la escala de investigación a nivel de laboratorio o planta piloto a la producción a escala industrial, y el alto coste que esto implica hacen, por el momento, que la introducción de dichas alternativas sostenibles sea complicada en el mercado. Falta, por tanto, mayores esfuerzos en la investigación de nuevos materiales, así como formas de abaratar los costes de producción, y de mejorar las propiedades que estos o sus mezclas pueden poseer. También falta dedicación por parte de los Organismos institucionales, cuyo trabajo no avanza al mismo ritmo que los avances científicos, dificultándose de esta manera la estandarización y uso de los nuevos envases y embalajes biodegradables.

The agri-food industry is one of the main consumers of materials used to make containers and packaging. The current manufacturing system is based on the production of plastic designed to contain and protect food. The reality no longer needs studies and research that affirm the negative impact that these plastics produce on the environment, public health and the quality of products. In addition, although the process of synthesis and production of plastics and packaging is fully standardized, it still involves an exorbitant cost that must be reduced to alleviate the global economic situation. A possible solution to the environmental and economic effects produced by this sector is the development of biodegradable packaging and packaging materials, that allow the use of waste generated in different areas and are sustainable or more respectful with the environment.

The objective of this study is to collect a large amount of bibliographic information about the current situation of biodegradable packaging. The materials of which they are composed, their synthesis and method of obtaining, the properties they present and their possible applications. It is also intended to identify the new trends that mark the direction of research into new biodegradable or compostable food packaging. As well as defining the legal framework that regulates the treatment of these materials, and developing a protocol for the selection of materials based on their properties, for its use in the food industry. This objective is addressed through a bibliographic search based on scientific rigor, through research in various databases, journals and scientific articles.

The results obtained offer an active discussion on the topic addressed. On the one hand, there is evidence that existing biodegradable packaging can be presented as an alternative to many of the containers and packaging made from plastic that are on the market. However, the difficulty of transferring the academic advances regarding its production to an industrial scale, and the high cost that its production implies at the moment, make it difficult to introduce these sustainable alternatives in the market. Therefore, there is a lack of greater efforts in the investigation of new materials and ways of lowering their production cost, and of the properties that these or their mixtures may possess. There is also a lack of dedication by the official institutions, whose work does not advance as quickly as scientific advances do, thus making it difficult to standardize and use the new biodegradable containers and packaging.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Envasado de alimentos

La Ley 11/1997 de envases y residuos de envases describe un envase como todo producto fabricado con materiales de cualquier naturaleza y que se utilice para contener, proteger, manipular, distribuir

y presentar mercancías, desde materias primas hasta artículos acabados, en cualquier fase de la cadena de fabricación, distribución y consumo. Se considerarán también envases todos los artículos desechables utilizados con este mismo fin (Ley 11/1997, de 24 de abril de 1997).

El envasado alimentario conlleva el contacto de determinados materiales con los alimentos de forma implícita. Tal y como declara en la última actualización de 2021 la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN), estos materiales son aquellos que están destinados a entrar en contacto con los alimentos, ya lo están y se encuentran destinados a tal efecto, o cabe esperar razonablemente que lo harán. Los materiales y objetos destinados a entrar en contacto con alimentos, estarán fabricados conforme a buenas prácticas de fabricación para que, en las condiciones previsibles de empleo, no transfieran sus componentes a los alimentos en cantidades que puedan: suponer un riesgo para la salud pública, provocar modificaciones inaceptables en la composición de los alimentos, o alterar sus características organolépticas.

El envasado de alimentos es una técnica que protege los productos alimenticios de factores/parámetros de deterioro como polvo, temperatura, luz, microorganismos, olores, daños físicos, golpes y otras contaminaciones ambientales. Además, asegura la seguridad y calidad de los alimentos, mejora la vida útil y minimiza el desperdicio y la pérdida de alimentos. El empaque protege de deterioros químicos, biológicos y físicos y actúa como almacenamiento temporal (Han et al, citado por Attkan, 2021).

A lo largo de la historia, encontrar formas en las que contener y guardar los alimentos ha sido un punto de especial interés en la humanidad. Desde la estandarización de la producción de envases para la industria alimentaria, los principales materiales empleados han sido el papel, cartón, vidrio y materiales sintéticos (Kumar, 2021). Dentro de estos, y desde el mismo momento de su concepción, todos los focos se han centrado en el empleo del plástico para la manufacturación de envases y embalajes, principalmente por su coste de fabricación y las excelentes propiedades que presentan para la conservación de alimentos (Marsh y Bugusu, 2007).

2.2 Impacto medioambiental y económico

La producción mundial de plástico alcanzó los 348 millones de toneladas métricas en 2017, y en 2018 se alcanzaron cifras cercanas a los 359 millones de toneladas métricas (Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021). En las últimas décadas el consumo de materiales poliméricos se ha ido incrementando progresivamente, tendencia que se estima que continúe en los próximos años. Como resultado de la creciente población humana y la urbanización de la sociedad, pronto será necesario utilizar el 25% de

la producción mundial de petróleo actual solo para fabricar polímeros plásticos convencionales (Ferreira et al, citado por Antohi, 2020). Si la tendencia continúa, para 2050 habrá 12000 millones de toneladas métricas de desechos plásticos.

Según el informe de 2018 de Plastics Europe, entre los sectores que demandan las mayores cantidades de producción de plástico se encuentra el del envase y embalaje, siendo el principal consumidor con un 39,7% del total, bastante por encima de los siguientes sectores demandantes (Jiménez et al., 2019). Casi el 66 % del total de residuos de envases se genera a partir de residuos de envases de alimentos (Kumar, citado por Attkan 2021). El mayor consumidor de plástico se encuentra en la industria del embalaje; más del 90 % de los envases flexibles están hechos de plástico, en comparación con solo el 17 % de los envases rígidos. La elevada producción de desechos y la percepción de una tendencia en aumento de estos genera un problema de gran importancia, y es que los plásticos sintéticos no son susceptibles de sufrir degradaciones tanto físicas, como químicas o biológicas. Del total de los residuos plásticos, se estima que únicamente el 9% es reciclado, y aproximadamente un 12% es eliminado mediante incineración (Parker, citado por Adohi, 2020). El resto, es depositado en contenedores abiertos en su gran mayoría o enterrados.

Actualmente el uso de los plásticos está siendo muy juzgado por su impacto medioambiental, lo que está produciendo cierto rechazo por parte del consumidor hacia los productos envasados con estos materiales. Esto se debe a la enorme cantidad de residuos plásticos que se está generando en los últimos años, no solo en vertederos terrestres, sino también en el mar.

Los residuos plásticos generados afectan al medioambiente de múltiples formas. Por un lado, la incineración de estos residuos durante su eliminación conduce a la liberación de gases nocivos tales como dióxido y monóxido de carbono, cloro, 1,3-butadieno, furanos, amidas, dioxinas, etc. Estos gases degradan la calidad del aire y aumentan la amenaza del calentamiento global, además de

conllevar numerosos riesgos para la salud pública por la naturaleza tóxica y carcinógena de muchas de estas sustancias (Smith, citado por Aggarwal, 2021). Sin embargo, este problema es superado en gravedad por otros problemas derivados de los desechos plásticos que no son incinerados, ya que estos se acumulan y abandonan, llegando a los mares y océanos. Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, se ha constatado que más de 8 millones de toneladas de plástico van a parar a los océanos cada año (entre el 15% y el 40% del plástico producido en el mundo). En el medio acuático se lleva a cabo la introducción de los desechos plásticos y microplásticos en los diferentes eslabones de la cadena trófica. Estos son absorbidos por los organismos vegetales, y pueden pasar a los animales de forma directa o a través del consumo de estos vegetales u otros animales. Este problema deriva en dos situaciones alarmantes; la desaparición de especies acuáticas y terrestres, y

la introducción de estos componentes plásticos en el organismo de los humanos mediante el consumo de alimentos contaminados (Lizarraga y Siche, 2020). Existen otras vías a través de las cuales los plásticos empleados en el envasado de alimentos se introducen en nuestro organismo. Así, durante el periodo de tiempo en el que un alimento se encuentra retenido en un envase plástico, se producen migraciones de los materiales plásticos a estos debido al contacto.

Por último, cabe mencionar que la acumulación desmesurada de plásticos en el planeta no solo causa efectos adversos en los ecosistemas y en la salud pública, su acumulación altera también múltiples paisajes urbanos y naturales, afectando directamente a sectores empresariales como el turismo.

Además del innegable impacto sobre el medioambiente que el uso de envases plásticos en la industria alimentaria genera, es un hecho que el sistema actual de envasado alimentario tiene consecuencias en el ámbito económico. Según el estudio de Antohi et al, sobre el impacto financiero de la sustitución de envases de plástico por biopolímeros biodegradables (2020), el reciclado de los plásticos convencionales no suele ser económicamente viable. Esta industria estandarizada genera cada vez más residuos en el planeta para los cuales, ni es rentable invertir en su reutilización y reciclado, ni lo es el hecho de acumularlos y abandonarlos. Para finalizar esta conclusión, existen estudios que afirman que, la producción de plásticos convencionales conlleva un 65% más de gasto energético que la producción de otros materiales destinados al mismo fin, como pueden ser los bioplásticos (Ahvenainen, 2003).

2.3 Envases biodegradables

Esta alarma social generada ha dado lugar a que gobiernos de algunos países hayan comenzado a tomar acciones para combatir esta gran acumulación de residuos. La Unión Europea ha intentado unificar estas actuaciones con el fin de establecer unos mínimos que todos los países de la UE deberían cumplir. Así, se ha definido la Estrategia Europea de Plásticos, según la cual en 2030 todos los envases comercializados deberán ser reutilizables, reciclables o compostables. Existen también directivas que van en línea con esta estrategia, como son la 2008/56/CE, que establece un marco de acción comunitaria para la preservación del medio marino; la 94/62/CE, que define las acciones a llevar a cabo para la prevención de desechos de residuos en vertederos, dándoles una segunda vida, y más recientemente la propuesta para plásticos de un solo uso, donde se restringe el uso de los mismos. Todo esto ha llevado a un gran movimiento de las empresas del sector del envase y embalaje para tomar acciones que permitan aumentar la sostenibilidad de sus productos. Una de las vías que más

relevancia está adquiriendo para lograr este objetivo es el uso de materiales biobasados, biodegradables y/o compostables (Jiménez et al., 2019).

La primera definición de “envase biodegradable” se describe en el Informe Brundtland de 1987. Según la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), el plástico biodegradable es “un plástico que se degrada debido a la acción de microorganismos naturales como bacterias, hongos y algas (ASTM, citado por Aggarwal, 2021). Estos se producen a partir de fuentes renovables y tienen características similares a los plásticos convencionales. El agua, el dióxido de carbono, compuestos inorgánicos o biomasa son los principales productos formados en la descomposición de los plásticos biodegradables.

Según Aggarwal, Shaikh y Yaqoob en su estudio “*An overview of biodegradable packaging in food industry*” (2021), el mercado de plásticos biodegradables se valoró en 4650 millones de dólares en 2019. Para 2025, se espera que este valor se incremente en torno a un 17%. En ese mismo año, la producción mundial de bioplásticos fue de aproximadamente 2 millones de toneladas, y cabe esperar que para 2024 la producción aumente a 2400 millones de toneladas. Dentro de la categoría de bioplásticos, en los que se encuentran los no biodegradables (polietileno, poliamidas, etc), y biodegradables (ácido poliláctico, mezclas de almidón, etc), estos últimos ya suponen el 55% del total de los bioplásticos producidos en 2019.

3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Está demostrado que el sistema actual que engloba el envasado y embalaje de los alimentos supone grandes problemas y consecuencias adversas para el medioambiente, la salud pública y la economía mundial. Aún a pesar de ser un hecho tan constatado, todavía se presentan diversos problemas, como dificultades para la aplicación de las numerosas aportaciones académicas y científicas en un modelo estandarizado para producir envases biodegradables a escala industrial, intereses económicos procedentes del sector del petróleo, la falta de regulación por parte de las instituciones pertinentes en la producción de plásticos, además del desconocimiento y falta de interés por parte del consumidor, al que todavía sigue pesando, de una manera más significativa, el precio final del producto. Por todo esto, es necesario continuar con la investigación de nuevos materiales y métodos de obtención diferentes, que permitan la introducción paulatina de los envases biodegradables en el mercado, y de esta forma abaratar el precio de producción para atraer la atención de los consumidores y, consecuentemente, de los organismos internacionales reguladores.

Por todo esto, el objetivo principal de este trabajo se centra en la compilación de información acerca de los avances existentes, o que están por llegar, en el campo de los envases biodegradables, para servir como recopilatorio de información que pueda estar al alcance de cualquier lector y cree, o al menos estimule, cierta concienciación sobre el uso que se debe hacer de los alimentos disponibles, y el rumbo que se debe tomar para garantizar un futuro sostenible.

Para la consecución de dicho objetivo, este trabajo tiene una serie de objetivos secundarios de entre los que destacan los siguientes:

- Análisis y revisión de los envases biodegradables existentes y otros componentes que se pueden introducir en el envasado alimentario
- Identificación de nuevos materiales que se pueden emplear en la confección de envases biodegradables
- Estudio de las condiciones de uso y métodos de obtención de dichos materiales
- Revisión de la normativa que regula la recogida y tratamiento de materiales y/o componentes que son, o pueden ser usados como envase alimentario
- Desarrollo de protocolos de selección del envase según su adecuación, con el fin de minimizar el impacto medioambiental

4. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la elaboración de este trabajo ha consistido en la búsqueda sistemática de información, mediante el uso de palabras clave en español e inglés. Para ello, se ha utilizado el motor de búsqueda bibliográfica AlcorZe, cuyo acceso es brindado por la Biblioteca de la Universidad de Zaragoza, y a través del cual se accede a las principales bases de dato de carácter científico disponibles. Además, se ha empleado Google como motor de búsqueda para acceder a otras bases de datos y sitios web. Las fuentes bibliográficas consultadas han sido:

- BOE: Boletín Oficial del Estado
- Dialnet: proyecto de cooperación bibliotecaria nacido en la Universidad de La Rioja, que recopila información y proporciona acceso a documentos publicados en cualquier país e idioma. Incluye revistas, capítulos de monografías colectivas, tesis doctorales, libros y otros documentos.
- Elsevier Iberoamérica: parte del grupo Elsevier, líder global en edición técnica en Medicina y Ciencias de la Salud, con más de 20.000 libros, 2.000 revistas científicas y bases de datos en Internet del mayor prestigio y difusión en 180 países. Trabaja con los más respetados

científicos e investigadores a nivel mundial, y cuenta entre sus publicaciones con excelentes referencias profesionales, conocidas y utilizadas por especialistas de todo el mundo.

- Google Scholar: buscador de Google enfocado y especializado en la búsqueda de contenido y literatura científico-académica.
- ResearchGate: plataforma creada en 2008 que permite la búsqueda científica entre más de 135 millones de publicaciones y la conexión con la comunidad científica que envuelve.
- ScienceDirect: marca registrada por Elsevier B.V. Ofrece millones de publicaciones de carácter científico y social.
- SpringerLink: base de datos de origen suizo que pertenece al grupo Springer Nature. Contiene investigaciones y documentos procedentes de periódicos, revistas, protocolos y trabajos de referencia.

Las palabras clave que han definido la búsqueda son las siguientes:

- En español: biodegradable, envase, industria, agroalimentaria, compostable, material, alimento, compuesto, medioambiente.
- En inglés: biodegradable, packaging, container, food, industry, component, environment.

Tras la selección y estudio de un gran volumen de bibliografía encontrada, y con los conceptos claros a desarrollar en este estudio, se ha realizado una segunda búsqueda más específica relacionada con los puntos concretos que componen el trabajo. Las palabras claves que se han usado son:

- En español: deshecho, agroindustrial, monómero, bionanocompuesto, plástico, tendencia, nanotecnología
- En inglés: waste, agroindustrial, polymer, bionanocomposite, plastic, trend, nanotechnology.

Como vía a seguir para la selección de toda la información recuperada, se han seguido las tendencias en cuanto a información y estudio que la mayoría de las investigaciones comparten. No se han usado filtros temporales ni de otro tipo, con el fin de recopilar la mayor cantidad de información posible.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. MATERIALES BIODEGRADABLES EN EL ENVASADO ALIMENTARIO

Todos los estudios e investigaciones revisados hasta el momento coinciden en cuáles son las características que debe presentar un material, para que su uso sea apto para la industria alimentaria. Previamente se ha comentado que las funciones del envase son las de contener y proteger, por lo que las características que interesan son sus propiedades mecánicas, como la elasticidad o resistencia.

También interesan sus propiedades térmicas, como la temperatura de fusión, para poder determinar el mejor método de producción, además de otras propiedades relacionadas con la protección de los alimentos como son la capacidad de transmisión de humedad y otros gases como el oxígeno del exterior al interior del envase.

En la actualidad, el uso de materiales 100% reciclados, biodegradables o destinados para su reutilización es una tendencia real e instaurada en el sector del envasado de alimentos. Muchas empresas que tienen un impacto en el mundo entero aplican este sistema en sus productos. Entre los muchos ejemplos existentes, *Burger King* sustituyó los recipientes y envases de patatas fritas y otros productos por otros elaborados con menos papel o de componentes biodegradables. *Coca-Cola* presentó una campaña con el fin de producir un envase 100% reciclable elaborado con un 30% de materiales derivados de plantas. La empresa multinacional Amazon ha lanzado diferentes campañas basadas en la economía circular y sostenibilidad de sus envases y embalajes, como el proyecto *Frustration-Free Packaging initiative*, que ha conseguido reducir en 2021 el peso de los envases/embalajes producidos en un 36%, empleando para su confección nuevos materiales como fibra de madera. Otras empresas del sector del embalaje han patentado sus propios envases biodegradables, como es el ejemplo de BEBOX y su patente del envase “Beblok”, producido a partir de pulpa moldeada totalmente biodegradable (Ariza et al, 2019).

No obstante, a pesar de todos estos materiales que ya se están empleando en la industria del envasado, la comunidad científica marca una clara tendencia sobre el camino que toman los materiales biodegradables, y por el que se va a dirigir su producción durante los próximos años. Este camino, en base a la exhaustiva búsqueda y recopilación bibliográfica, es el de los bioplásticos.

European Bioplastics es una asociación europea con sede en Berlín, formada por distintas compañías asociadas, y liderada por un comité formado por expertos de todas ellas. Esta se dedica, sin fines lucrativos, a diversos estudios, entre los que se encuentra la valoración de la biodegradabilidad/compostabilidad de sus productos, difusión de la información obtenida o comunicación de las bases que asienta la norma UNE-EN 13432 sobre requisitos de envases y embalajes valorizables para su compostaje o biodegradación. Según ésta, los bioplásticos se definen como “aquellos plásticos de origen biológico, biodegradables, o ambas cosas, que poseen propiedades similares a los plásticos convencionales, pero con otras ventajas, como una huella de carbono menor, o más opciones en la gestión de los deshechos producidos durante su procesado” (2019). Cuando se define el concepto de bioplástico hay que tener en cuenta el significado de biodegradabilidad, ya que según la norma UNE-EN 13432, ésta depende de la estructura química, independientemente del origen (2001). Por tanto, no todos los plásticos de origen natural son biodegradables, al contrario que

algunos plásticos procedentes de la síntesis petroquímica, que si lo son. En conclusión, los bioplásticos se componen de los polímeros cuyo origen es una fuente renovable, o los plásticos que son biodegradables y cumplen con la norma UNE-EN 13432 de biodegradación y compostaje (Quijada et al., citado por Devis y Gallur, 2013).

Como se observa en la Figura 1, existe en la actualidad cierto dominio en la producción de plásticos biodegradables frente a los bioplásticos que no lo son, siendo los más producidos las mezclas de almidón, el ácido poliláctico (PLA) o el tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT), entre otros componentes que se caracterizan más tarde en este estudio.

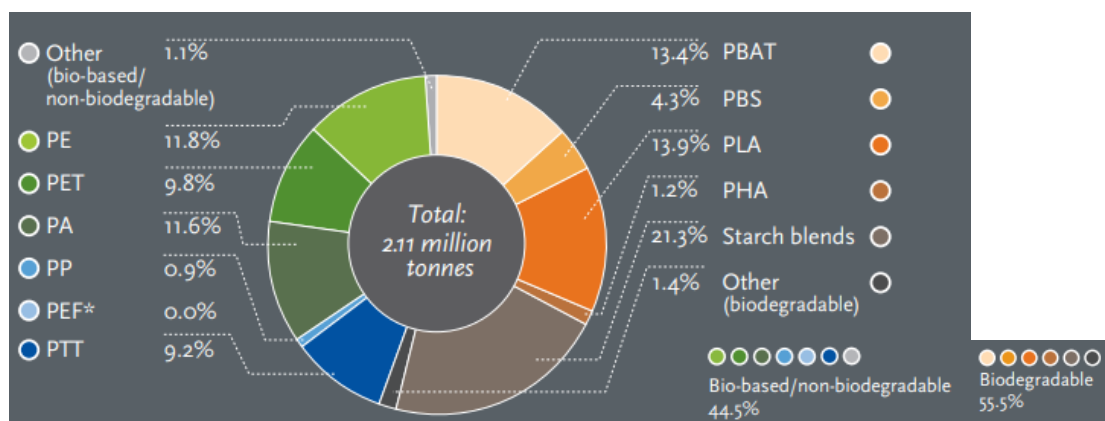


Figura 1. Capacidad de producción global de bioplásticos en 2019 (European Bioplastics, 2019).

Tal y como especifican Khalil et al., en su estudio *“Biodegradable films for fruits and vegetables packaging application: Preparation and properties”*, los materiales de envasado a base de polímeros de base biológica se pueden clasificar en tres grupos principales en función de su origen y modo de producción: extraídos de la biomasa, sintetizados a partir de monómeros y producidos por microorganismos (2018).

5.1.1. Materiales extraídos de la biomasa

Se espera que la población mundial aumente en 10 mil millones de personas en 2050. Ante este hecho, los países de todo el mundo se preparan para el abastecimiento de la población, con el desarrollo de los sectores industriales y agrícolas. Como consecuencia del aumento de la producción de alimentos, se origina un aumento del volumen de desechos y subproductos de origen agroalimentario. El sector agrícola es el principal productor de biomasa, y se espera que alcance 4 mil millones de toneladas para 2050 (Duque-Acevedo et al, 2020). El interés actual radica en darle uso a la biomasa producida para

aumentar el valor añadido de la producción agroalimentaria, y la industria alimentaria, que se encuentra entre las industrias de crecimiento más rápido, es el sector con mayor demanda de material de embalaje biodegradable. Los envases biodegradables elaborados a partir de desechos agroindustriales se pueden clasificar en dos grupos principales: desarrollados directamente a partir de desechos agroindustriales o biopolímeros extraídos de los polímeros de desechos agroindustriales (Attkan et al, 2021).

El material de envasado desarrollado directamente a partir de desechos agroindustriales mínimamente procesados, se compone de materiales 100 % naturales y biodegradables. Existen infinidad de estudios con diversos materiales, como paja o cáscara de arroz, tortas de aceite y orujo de frutas, fibras de espárrago, entre otros. Estos materiales de envasado biodegradables son compatibles con el método de producción del plástico existente, como el moldeo por inyección, la extrusión, la formación térmica, el prensado en caliente y la formación al vacío, sin necesidad de modificar el equipo de producción existente (Davies, citado por Attkan et al., 2021). G. Yu et al. utilizaron un material con usos similares a los de determinados plásticos, a partir de fibras procedentes de diferentes residuos agrícolas mezcladas con compatibilizadores (2018). Una empresa alemana llamada “Bio-Lutions” está trabajando activamente en la India para producir vajillas a partir de la paja de arroz sin extraer celulosa. Estos artículos de mesa están hechos a base de fibra natural y también se pueden usar para almacenar alimentos húmedos y grasos.

Para aclarar el proceso de producción de estos envases, se plasma en la Figura 2 un ejemplo de modelo de producción de un envase biodegradable, formado a partir de almidón y celulosa procedente de desechos agrícolas, elaborado en un estudio del profesor Raúl Siches, expuesto en el Webinar “Desarrollo de envases biodegradables a partir de desechos industriales” (2020).

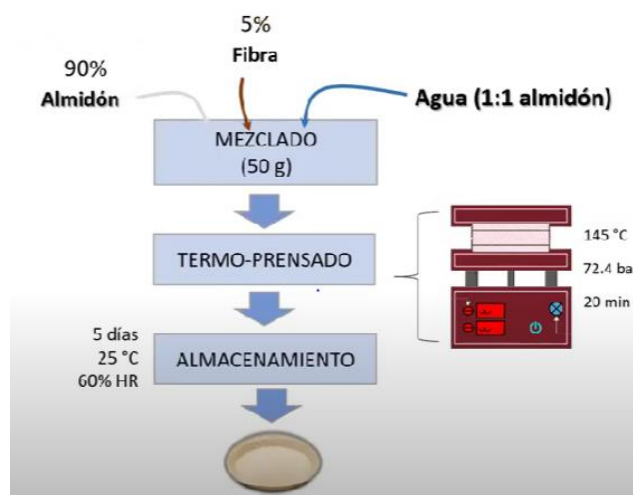


Figura 2. Proceso de producción de un envase biodegradable a partir de residuos agroindustriales (Siche et al, 2020)

Los biopolímeros extraídos de desechos agroindustriales pueden ser de origen vegetal o animal. Además, también se pueden subclasificar en proteínas, carbohidratos y lípidos.

Las proteínas son biopolímeros que, por su composición y estructura, presentan múltiples propiedades funcionales, atribuidas a su alta capacidad de unión intermolecular a través de diferentes tipos de enlaces. Una vez en la interfaz, las proteínas pueden interactuar con las moléculas vecinas para formar una película viscoelástica fuerte y cohesiva. La capacidad de formar películas depende de características como el peso molecular, la carga, la flexibilidad y la estabilidad térmica. El grado de elongación, la naturaleza de las secuencias de aminoácidos y la distribución y suma de las interacciones entre las cadenas de proteínas están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas de las películas (Calva, Jiménez y Lugo, 2019).

El colágeno es una proteína del tejido conectivo compuesta por varios polipéptidos, que incluye hidroxiprolina, prolina, glicina y lisina. El contenido de glicina es responsable de la flexibilidad del colágeno (Gelse et al., citado por Attkan et al., 2021). Se incorpora en películas de celulosa y alcohol polivinílico (PVA). La película de mezcla de celulosa es quebradiza y débil, por lo que es recomendable usar polipéptidos que lo sustituyan de mayor peso molecular como la gelatina, formada por la degradación molecular del colágeno. Esta tiene excelentes capacidades de formación de películas y consta de 19 aminoácidos. El peso molecular, la composición de aminoácidos y el tipo de plastificante utilizado influyen en gran medida en la barrera y las propiedades mecánicas de la película (Gómez et al., citados por Attkan et al., 2021). La estabilidad térmica condicionada por el procesamiento limita sus aplicaciones. Para mejorar o modificar las propiedades mecánicas y de barrera de la película, se agregan varios aditivos para lograr películas con buenas propiedades para el envasado de alimentos.

Por ejemplo, el envasado de embutidos emplea films de gelatina al 4% con 2,5% de aceite de maíz y 5% de aceite de oliva (Ramos et al., citados por Attkan et al., 2021).

Las caseínas son el principal grupo de proteínas que se obtienen de la leche. Estas se pueden emplear para producir películas opacas e insolubles en agua, las cuales además presentan propiedades de barrera y de permeabilidad frente al oxígeno aceptables. Las proteínas del lactosuero se obtienen, al igual que las caseínas, mediante procesos de filtración del lactosuero y de la leche, respectivamente. Estas últimas presentan mejores propiedades de barrera frente al oxígeno que las caseínas cuando se forman películas, pero su resistencia mecánica es peor y son muy permeables frente al vapor de agua.

La clara de huevo consta de varias proteínas entre las que destaca la ovoalbúmina (54%). Con ella se pueden producir films muy elásticos y transparentes, pero presenta una alta permeabilidad al vapor de agua y su sensibilidad térmica dificulta su procesamiento.

La queratina es el principal componente estructural de las plumas de pollo. Presenta buena capacidad para la formación de films, aunque los films obtenidos tienen baja resistencia mecánica y son sensibles a la humedad (Calva, Jiménez y Lugo, 2019).

Los estudios que se centran en el empleo de proteínas de origen vegetal emplean mayoritariamente la proteína de soja y el gluten del trigo. Ambos se caracterizan por sus buenas propiedades para la formación de films, y a su vez presentan malas características estructurales que provocan films quebradizos y sensibles a la humedad. El gluten de trigo también proporciona propiedades de barrera selectiva contra gases y es insoluble en agua mientras no se sumerja (Calva, Jiménez y Lugo, 2019). No obstante, otros autores concluyen que la adición de plastificantes como el ácido esteárico, el glicerol o la goma gelán a la proteína de soja texturizada mejora las propiedades mecánicas y térmicas, y reduce la sensibilidad a la humedad para la formación de envases alimentarios biodegradables a base de soja (Lhoda y Nteravali, citados por Attkan et al., 2021).

Debido a su gran producción a nivel mundial, parece apropiado mencionar también la zeína, la principal proteína del endospermo del maíz y el principal residuo de la producción de almidón de maíz. Posee una excelente capacidad de formación de película, con alta resistencia, brillo, buena barrera contra la humedad y el oxígeno (Ghanbarzadeh y Oromiehi, 2008).

Las técnicas utilizadas para desarrollar películas proteicas son similares a las utilizadas en el procesamiento de plásticos sintéticos, tanto los métodos húmedos como secos. Los métodos húmedos comprenden la fundición con solventes, mientras que, en los métodos secos, los biopolímeros generalmente se comprimen, moldean o extruyen, generando un termoplástico (De la Caba et al., citado por Calva, Jiménez y Lugo, 2019). En ambos procesos, las proteínas son

desnaturalizadas mediante tratamientos por calor, adición de ácido o base y/o un solvente para permitir una mayor extensión de su estructura. Una mayor extensión permite una mayor interacción y asociación entre las cadenas de proteínas, cuya fuerza interactiva a través de interacciones electrostáticas, fuerzas de Van der Waals, enlaces de hidrógeno, enlaces covalentes y disulfuro, genera una matriz cohesiva de la película proteica (Dhall RK, citado por Calva, Jiménez y Lugo, 2019). Sin embargo, a pesar de los avances en el desarrollo de películas proteicas como materiales de envase, sus propiedades físicas siguen siendo inferiores a las de las películas sintéticas.

La estructura y funcionalidad de los biopolímeros proteicos se pueden mejorar empleando diversos métodos. Entre ellos se encuentran la plastificación, que consiste en la incorporación de un plastificante (agua, glicerol, gelatina hidrolizada, etc) para reducir las interacciones proteína-proteína y proporcionar flexibilidad y extensibilidad. Mediante la mezcla, extrusión, laminación o recubrimiento con otros polímeros que poseen las propiedades de barrera deseables, como otras proteínas, otros polímeros o polisacáridos, es posible aprovechar las distintas características funcionales de cada compuesto.

La quitina y el quitosano son dos de los biopolímeros cuyas aplicaciones en el procesado de envases biodegradables se han investigado en mayor número de estudios. La quitina es un copolímero lineal cuyos monómeros se organizan dentro de la estructura de forma aleatoria, según el método de procesado (Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021). Esta está presente en hongos o en el caparazón de insectos o crustáceos. El tratamiento industrial para la obtención de quitina emplea HCl y NaOH. El HCl elimina los minerales y luego se enjuaga con agua destilada. El material desmineralizado se seca, seguido de un tratamiento con NaOH para eliminar las proteínas para el aislamiento de quitina (Elieh-Ali-Komi y Hamblin, citado por Attkan et al, 2021). El quitosano se obtiene de la N-desacetilación parcial de la quitina. Tanto la quitina como el quitosano se utilizan para producir envases biodegradables y antimicrobianos comestibles para frutas y verduras para prolongar su vida útil (Kaur, citado por Attkan, 2021). Las propiedades del quitosano incluyen la capacidad de formar una película sin el uso de aditivos, buena permeabilidad al oxígeno y al dióxido de carbono, y excelentes propiedades mecánicas y propiedades antimicrobianas. Sin embargo, su insolubilidad en la mayoría de solventes dificulta su obtención. El N-carboximetilquitosano o N-carboxietilquitosano es el quitosano modificado preparado para su aplicación en diferentes industrias. Ambos se aplican para producir películas biodegradables para embalaje, y como recubrimiento comestible para prolongar la vida útil de frutas y verduras frescas (Mc Daniel y Zhao, citados por Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021).

No obstante, su uso en la industria agroalimentaria puede verse relevado en un futuro, ya que según Chiralt et al, su uso tiene limitaciones como una toxicidad potencial (2016).

El almidón es un biopolímero cuyos gránulos consisten en estructuras macromoleculares ordenadas en capas, y cuyas características en cuanto a composición, cantidad y forma varían en función del tipo de fuente de la que provenga. Su composición química es la de un polisacárido formado únicamente por unidades glucosídicas, es decir, múltiples moléculas de glucosa que se repiten. Para hacer posible la fabricación de un polímero a partir de almidón, es necesario aportar diferentes reactivos a la mezcla y garantizar ciertas condiciones que permitan su obtención. En general, el agua se recomienda como el mejor plastificante, aunque no debe encontrarse en proporciones muy altas con relación al almidón, debido a que, para extraerla de la mezcla, es necesario elevar la temperatura a la de ebullición del agua, lo que puede degradar la estructura del almidón. Al igual que el agua, la glicerina es un plastificante y además brinda humectación al polímero. El PVA es recomendado también como plastificante. El proceso de tratamiento, así como los porcentajes de los compuestos anteriormente nombrados varían dependiendo del origen del almidón: patata, maíz, trigo, mandioca, arroz y la judía, teniéndose que desarrollar casi un tratamiento exclusivo para cada uno de ellos (Oliva, 2012). Existen dos formas principales de obtener polímeros biodegradables a base de almidón: por extrusión del almidón granular para obtener su biopolímero (Santana et al., citado por Attkan et al., 2021) o agregando nanopartículas para producir nanocompuestos de almidón. En un proceso de extrusión continua, el plástico se recubre sobre el almidón natural y el agua mediante el uso de energía termomecánica, produciéndose lo que es conocido como almidón termoplástico (Attkan et al., 2021). Este material puede emplearse como alternativa a los polímeros sintéticos para la producción de envases, bolsas o bandejas. La biodegradación del almidón termoplástico se realiza mediante hidrólisis del enlace acetal (Netravali y Chabba, citados por Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021). Los nanocompuestos de almidón han sido investigados como material de envasado de alimentos debido a su biodegradabilidad, bajo coste y gran disponibilidad (Shina y Okamoto, citado por Villa, 2015). Por ejemplo, la adición de celulosa y nanocelulosa reduce la sensibilidad al agua y mejora las propiedades térmicas y mecánicas, aunque este comportamiento depende de la formación de la red de microfibrillas de la celulosa dentro de la matriz de almidón.

La celulosa es el biopolímero más abundante que se encuentra en la naturaleza y actúa como sistema de soporte en bacterias y plantas. Generalmente, las moléculas de celulosa tienen un carácter anfipático y una alta densidad de grupos hidroxilo (Ahn et al., citados por Attkan et al, 2021). La

celulosa es, en su mayoría, un componente de las paredes celulares de las plantas que no es digerible. Industrialmente, la celulosa se extrae de la madera de árboles o de plantas herbáceas con gran cantidad de celulosa en el tallo, como la caña de azúcar, diversas gramíneas o el algodón. Otras fibras textiles, como el yute, el cáñamo y el lino también poseen gran proporción de este polisacárido. El proceso más extendido para la obtención de celulosa es el método Kraft. En este proceso, se separan las fibras de la lignina que las une mediante un tratamiento químico de la madera, que previamente se convierte en astillas. El proceso Kraft permite obtener una pulpa de gran resistencia mecánica, ya que la separación de las fibras se produce sin dañarlas. Por otra parte, mediante procesos auxiliares y complementarios se pueden recuperar los productos químicos que intervienen en la producción de la pulpa y volver a usarse en un ciclo siguiente (Oliva, 2012). La celulosa en forma de papel y cartón se usa como cobertura exterior en el envasado de alimentos, es opaca y muy biodegradable en su forma natural, aunque con poca resistencia al paso de gases. Este polisacárido se emplea también como película comestible, la cual tiende a ser resistente a grasas y aceites y es soluble en agua, flexible y resistente. Cuando se aplican películas a base de celulosa a los alimentos musculares, se minimiza el escurrimiento durante la cocción, lo que reduce la absorción de aceite durante la fritura. Cuando se aplica en alimentos de aves o mariscos, reduce la pérdida de humedad (Cutter, citado por Attkan et al., 2021). Las películas biodegradables a base de celulosa generalmente proporcionan la barrera contra el oxígeno y el aceite, y las propiedades mecánicas de productos alimenticios como conos de helado y pizza. Para la fabricación de productos cárnicos y avícolas listos para el consumo en los que se incluyen salchichas, salchichas frankfurt, mortadela y otros productos cárnicos, las industrias cárnicas utilizan en gran cantidad las envolturas de celulosa (Heinz y Hautzinger, citados por Attkan et al., 2021). La celulosa se transforma en diferentes compuestos en función de su uso previsto. Esta transformación se logra mediante grados de sustitución de los diferentes grupos. El acetato de celulosa es uno de los derivados importantes de la celulosa. Brinda resistencia a la tracción y ofrece características similares al polipropileno (Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021). Las nanofibras de celulosa son biodegradables y reciclables, y su uso como nanorellenos dentro de la matriz de nanocompuestos mejora el módulo de elasticidad y las propiedades térmicas de los envases en los que se emplean (Kvien, Oksman y Petersson, citados por Villa, 2015). Su empleo también presenta problemas derivados de la baja compatibilidad de la nanocelulosa con matrices apolares, debido a su carácter hidrofílico. Para mejorar esta compatibilidad, la celulosa se puede someter a procesos como la esterificación para mejorar su miscibilidad en dichas matrices, o añadir moléculas que actúen como surfactantes, cuya parte hidrófila se adsorba a la superficie de la celulosa, y su parte hidrófoba se solubilice en la matriz (Hubbe et al., 2008). La nanocelulosa se obtiene mediante tratamiento químico, mecánico y enzimático o mediante sus combinaciones (Duan et al.; Liu et al., citados por Attkan et al.,

2021). También se puede obtener por métodos de fibrilación mecánica que engloban la homogeneización, microfluidización, ultramolida de biomasa y pretratamientos, llevados a cabo para reducir el gasto energético y mejorar la calidad de las nanofibras (Habibi, citado por Attkan et al., 2021). Algunos ejemplos de nanofibras de celulosa producidas se han obtenido a partir de la cáscara de plátano, mediante procesos químicos y enzimáticos, o de la celulosa de la pared bacteriana de *Gluconacetobacter xylinus*, mediante su cultivo en el jugo de residuos de piña, extrayendo los cristales de celulosa de su pared celular por hidrólisis con ácido sulfúrico (Anwar, Arcana y Bundjali, citados por Attkan et al., 2021). Finalmente, la celulosa es biodegradada por la acción de peroxidasas de hongos y bacterias en reacciones de oxidación enzimáticas (Klemm et al., citados por Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021).

La pectina es un polisacárido ramificado. Los enlaces de distintos compuestos a la cadena principal le otorgan su propiedad gelificante, por lo que es empleada en la industria alimentaria principalmente para la producción de mermeladas de frutas y otros geles. Se encuentra principalmente en la pared celular de frutas cítricas y plantas, y su producción consiste esencialmente en la extracción de la protopectina de las cáscaras, mediante hidrólisis en medio ácido junto a un tratamiento térmico, su purificación (prensado, filtración y concentración), precipitación en alcohol y la posterior purificación del coágulo por lavado. Al final de estas etapas se obtienen las pectinas que posteriormente son secadas y molidas, constituyendo así el producto acabado (Oliva, 2012). Debido a la alta capacidad de absorción de agua de las pectinas, éstas solo pueden ser usadas en el sector del envasado alimentario como envases para alimentos con un bajo contenido en agua, como productos de panadería, o recubrimiento de determinados vegetales. Sumados a su sensibilidad a la humedad, su uso presenta otros problemas como malas propiedades térmicas y mecánicas, las cuales pueden subsanarse mediante la mezcla de pectinas con otros polímeros (Tharanathan, citado por Attkan et al., 2021).

5.1.2. Materiales sintetizados a partir de monómeros

El ácido poliláctico (PLA) es el bioplástico que cuenta con mayor cantidad de estudios, relacionados con sus fuentes de origen, las propiedades plásticas que posee y sus posibles aplicaciones dentro del sector del envasado alimentario. Con un crecimiento exponencial dentro del mercado de envases y embalajes, posee ciertas propiedades que superan a las de algunos plásticos convencionales, con un precio de producción menor (Auras, Singh y Singh, 2005). Se trata de un poliéster alifático termoplástico obtenido tras la polimerización del ácido láctico, producido a partir de la fermentación

de la glucosa o sacarosa procedentes de residuos de vegetales como la caña de azúcar, maíz, remolacha azucarera o tapioca, entre otros (Sorrentino, Gorrasi y Vittoria, 2007). La producción industrial de este biopolímero comienza con la extracción del almidón, luego los microorganismos lo transforman en una molécula más pequeña de ácido láctico o 2 hidroxipropiónico, un monómero que se polimeriza formando cadenas, con una estructura molecular similar a los productos de origen petroquímico, y que se unen entre sí para formar el PLA (Oliva, 2012). Posee buenas características mecánicas, un alto grado de transparencia y su procesamiento es relativamente sencillo. Además, tiene una permeabilidad al vapor de agua superior a la de los films de polietileno convencionales y una moderada permeabilidad al oxígeno (Basha et al., 2011). Realmente existen múltiples procesos para la obtención de PLA, por lo que se adjunta en la Figura 3 un diagrama de flujo de los procesos que involucran su producción y biodegradabilidad.



Figura 3. Ciclo de vida del PLA (Oliva, 2012).

No obstante, en otros estudios como el de Oliva (2012), se afirma que la obtención del PLA es bastante compleja, y que presenta diversos inconvenientes entre los que destaca su alto coste de producción. Algunos ejemplos de los problemas que presenta la obtención del PLA, y que generan este sobrecoste, son la dificultad para estandarizar un proceso de producción en continuo, ya que durante el proceso de fermentación se producen otros subproductos y metabolitos secundarios que se deben retirar para mantener un medio de cultivo óptimo. Además, la producción del ácido láctico acidifica el medio, lo que conlleva la reducción de la formación del mismo, siendo necesaria la adición de álcalis como hidróxidos o carbonatos, lo cual encarece el proceso (2012).

El PLA es un material biodegradable y compostable, ya que su final de ciclo incluye la opción del compostaje industrial produciendo biogás y/o compost según la norma UNE-EN 13432 (2001). Existen infinidad de estudios que muestran las aplicaciones que pueden tener en el envasado de alimentos, como la formación de films, bandejas, recipientes, bolsas y contenedores, además de múltiples productos en venta disponibles, como el plástico Ecovio, que está compuesto por PBAT, también conocido como Ecoflex y PLA, ambos biodegradables. Este plástico ya se comercializa en forma de bolsas en supermercados como Aldi (Kanthak y Söling, 2012). En la web de *envasesbiodegradables.es* se puede encontrar envases, cubertería y bolsas elaboradas 100% con PLA, entre otros muchos ejemplos.

La policaprolactona (PCL) es un poliéster alifático de origen fósil totalmente biodegradable por la acción de microorganismos. Puede ser obtenido por la polimerización de apertura del anillo de la ϵ -prolactona, mediante el empleo de aniones, cationes y catalizadores. Actualmente, la función principal del PCL en la industria es su empleo como aditivo para otros polímeros, mejorando de esta forma las propiedades mecánicas de la mezcla (Oliva, 2012). Un ejemplo de mezclas con otros biopolímeros se muestra en el estudio de Amaya Jorge (2018) "Estudio de la degradabilidad del PCL dosificado con la lignina de la fibra de banano", en el que se estudia la formación de biopolímeros en los que se introduce la lignina en la matriz de PCL, arrojando datos interesantes sobre mezclas con propiedades rígidas, potencialmente aplicables para el envasado de alimentos. La mezcla de quitosano y PCL forma un producto con una tasa de transmisión del vapor de agua mejorada, además de aumentar la hidrofobidad de la película, lo que en conjunto alarga la vida útil de los alimentos almacenados (Krishnaswamy, Madihally y Sarasam, 2006). La mezcla de PCL con succinato de polibutileno (PBS), junto con la adición de nanotubos de carbono para equilibrar las viscosidades de ambos polímeros, da lugar a una resina biodegradable con buenas propiedades térmicas y mecánicas. Como último ejemplo, también se han estudiado mezclas de PCL, PLA y almidón termoplástico que, junto con el empleo de diversos ácidos como compatibilizantes, ofrecen una película biodegradable (Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021).

El succinato de polibutileno (PBS) es un monómero que se puede obtener tanto de fuentes fósiles como de renovables por fermentación bacteriana, mediante el empleo de microorganismos como *Anaerobiospirillum succiniciproducens* (Ávalos et al., 2020). Se produce por reacción del etilenglicol y 1,4-butanodiol con ácidos carboxílicos alifáticos tales como ácido succínico o adípico. Los polímeros de la familia de los PBS son termoplásticos semicristalinos con una temperatura de fusión entre 90°C

y 120°C y una cristalinidad entre 35-45%. Tienen una resistencia mecánica de unos 30 MPa, acercando sus características mecánicas a plásticos sintéticos como el polipropileno o polietileno. Como se observa en el estudio publicado en la revista *Plásticos Modernos* (2018) “Desarrollo de botellas de PBS biodegradable fabricadas por inyección-soplado para el envasado de zumo de naranja”, algunas mezclas de PBS con otros polímeros dan lugar a un material óptimo para la confección de envases alimentarios.



Figura 4. Botella producida a base de PBS biodegradable (Jiménez, 2019)

Las propiedades reológicas y térmicas del PBS pueden mejorarse mezclándolo con otros compuestos. Este biopolímero también ha sido mezclado con nanotubos de carbono, tal y como exponen Ali y Mohan (2010), obteniéndose películas que presentan un interesante potencial de sustitución de algunos plásticos sintéticos.

El PBAT es un copoliéster de ácido adípico, 1,4-butanodiol y ácido tereftálico, producido a partir de tereftalato de dimetilo. La empresa BASF, principal productora de este biopolímero y que posee una de las patentes del compuesto bajo el nombre de Ecoflex, lo describe como el primer polímero de origen fósil biodegradable y completamente compostable, certificado y comprobado bajo los estándares de biodegradabilidad de la norma UNE-EN 13432. La biodegradación del PBAT se produce mediante la acción enzimática de determinados microorganismos como *Stenotrophomonas sp.* que degradan el 10,14% de las películas formadas de PBAT en 5 días (Kanwal et al., 2021). El PBAT posee características muy similares a la de los plásticos sintéticos, destacando su flexibilidad y resiliencia, por lo que es comercializado como una alternativa a los materiales plásticos convencionales como el polietileno para la fabricación de bolsas o envolturas de envases, entre otras muchas posibles

aplicaciones. Debido a la aleatoriedad de su estructura química, el PBAT no puede cristalizar en un grado significativo. Esta característica deriva a su vez en otras propiedades físicas: amplio punto de fusión, bajo módulo elástico y rigidez, pero alta flexibilidad y tenacidad. La flexibilidad y dureza de este polímero lo hace ideal para mezclar con otros polímeros biodegradables fuertes y rígidos, como el PLA para la producción de envases (Bian et al., 2021). Como se describe en el estudio *“Preparation, Mechanical, and Thermal Properties of Biodegradable Polyesters/Poly(Lactic Acid) Blends”*, la síntesis del PBAT consiste en una policondensación en estado fundido que se lleva a cabo con la adición de ácido adípico y 1,4-butanodiol, en una relación molar prediseñada, en un reactor de acero inoxidable. Mediante agitación se eleva la temperatura, y el agua formada durante la síntesis es eliminada por destilación. Este proceso se extiende 1-2 horas y después se añade ortotitanato de tetrabutilo (TBOT). Se vuelve a aumentar la temperatura y se mantiene la reacción cuatro horas en condiciones de vacío. A continuación, se añade el tereftalato de dimetilo y TBOT como catalizadores, y el 1,4-butanodiol. La reacción se extiende durante otras dos horas y finalmente, se vuelve a aumentar la temperatura y se mantiene el proceso por más de 20 horas en condiciones de alto vacío (<50Pa) (Jie et al., 2010).

5.1.3. Materiales producidos por acción microbiana

Estos materiales se pueden obtener como productos de las rutas metabólicas de microorganismos biodisponibles de forma natural, o modificados genéticamente. Las principales sustancias producidas por microorganismos son los polihidroxicanoatos (PHA), de los que destaca el polihidroxibutirato (PHB).

Los PHA son polímeros naturales producidos por bacterias, que los utilizan como reserva de nutrientes. Son poliésteres formados por unidades o monómeros de hidroxiacidos polimerizados en forma lineal. Por ser biodegradables, por sus propiedades físicas semejantes a las de los plásticos derivados del petróleo y por ser producidos a partir de recursos renovables, los PHA han despertado un gran interés. En los PHA, los monómeros que se enlazan para formar la cadena del polímero son moléculas de diversos hidroxialcanoatos. Todos los PHA forman la misma estructura básica de poliéster, con unidades de tres carbonos formando la estructura principal del polímero, pero difieren en el tipo de grupo alquilo que se encuentra unido al carbono número 3 de cada monómero. Hasta la fecha de hoy, se han descubierto más de 100 monómeros diferentes en los PHA producidos por bacterias, aunque sólo unos cuantos se han producido en grandes cantidades y se han caracterizado. Como consecuencia, se sabe poco sobre las características químicas y mecánicas de muchos de los

polímeros que las bacterias pueden producir. Existen PHA con monómeros rectos, ramificados, con o sin dobles enlaces y también con anillos aromáticos. Son especialmente interesantes los PHA que contienen grupos químicos funcionales en las cadenas laterales y que permiten llevar a cabo modificaciones químicas posteriores, pues esto posibilita la síntesis de nuevos polímeros semisintéticos con nuevas propiedades que permitan nuevas aplicaciones de los PHA, conservando en la mayoría de los casos su biodegradabilidad. La longitud de la cadena lateral y el grupo funcional tienen una considerable influencia sobre las propiedades del polímero, como son, el punto de fusión y la cristalinidad del bioplástico, y por lo tanto determinan el tipo de procesamiento que se requiere y la aplicación final que este puede tener. La especie de bacteria empleada, el tipo de fuente de carbono que actúa como sustrato y las condiciones de cultivo determinan la composición química del PHA producido. Las bacterias producen los PHA a partir de sustratos orgánicos, como glucosa, sacarosa, aceites, alcoholes, ácidos orgánicos o hidrocarburos, y los acumulan en grandes cantidades dentro de la célula en forma de gránulos, llegando a constituir hasta el 90% de la biomasa (Aggarwal, Shaikh y Yaaqoob, 2021). Las bacterias productoras los usan como material de reserva que puede ser utilizado posteriormente, bajo condiciones de limitación de nutrientes, para mantener su metabolismo. La cantidad de polímero producido y acumulado depende de la especie de bacteria y de las condiciones en las que se cultiva. En general, condiciones de desbalance de nutrientes en el medio usado para cultivar la bacteria favorecen su producción. Para producir PHA son especialmente favorables condiciones de cultivo en las que hay una concentración alta de fuente de carbono, que la bacteria utilizará como materia prima para sintetizar el PHA, por ejemplo, sacarosa. Pero además existe una limitación para el crecimiento, como niveles de oxígeno bajos o escasez de otros nutrientes. Es decir, cuando se da de comer en exceso a la bacteria, pero de forma desbalanceada, la bacteria produce PHA en vez de multiplicarse (Oliva, 2012).

Desde la década de los 80, la producción a escala industrial de PHAs tiene aplicaciones en múltiples sectores, entre ellos el del envasado alimentario. La primera patente de un PHA fue el Biopol, una mezcla de PHB e hidroxibalerato que sirve para la producción de botellas, películas plásticas y fibras (Blog Ecology, 2018)

En el estudio “Polihidroxibutirato: un termoplástico biobasado y biodegradable con interés industrial” (Aldas et al., 2017) publicado en la revista *Plásticos modernos* se encuentra información muy interesante sobre la caracterización, síntesis y aplicaciones del PHB. El PHB es un polímero de almacenamiento intracelular altamente cristalino, producido por una amplia variedad de bacterias. Representa un material biodegradable con una alta capacidad para reemplazar a los plásticos

sintéticos. El PHB es el poliéster de cadena más corta dentro de la familia de los PHAs, es ópticamente activo y presenta un centro quiral. Tanto el PHB como los poliésteres naturales presentan la misma configuración para el centro quiral, el cual se encuentra en la posición 3. Esta posición es muy importante, tanto para sus propiedades físicas como para la actividad enzimática que actúa en su biosíntesis y biodegradación (Lenz y Marchessault, citados por Aldas et al., 2017). El PHB se utiliza mayoritariamente en algunas aplicaciones prácticas como en la fabricación de envases plásticos biodegradables (Arrieta et al., citados por Aldas et al., 2017). Sin embargo, no se fabrica gran variedad de productos a base de PHB, ya que tienen un mayor coste en comparación a otros polímeros biodegradables. Se trata de un polímero relativamente rígido y frágil y presenta una baja estabilidad térmica, encontrando ciertas limitaciones industriales en su procesado. Las reacciones de síntesis del PHB son las mismas que la de cualquier otro PHA, sin embargo, la síntesis de PHB en bacterias nativas o recombinantes mediante fermentación es un proceso bastante costoso (Moire, Poirier y Rezzonico, 2003). Mediante ingeniería genética, los genes de los enzimas implicados en la síntesis de PHB que se encuentran juntos en un operón, se clonan y posteriormente estos se introducen en una bacteria como *E.coli*. De esta manera, las bacterias genéticamente manipuladas que contienen el operón pueden expresar los enzimas y sintetizar PHB en grandes cantidades a partir de una amplia gama de compuestos orgánicos (Lenz y Marchessault, citados por Aldas et al., 2017). Después de la fermentación, el PHB puede obtenerse a partir de la biomasa por extracción con disolventes orgánicos. El PHB exhibe una variedad de propiedades óptimas para el envasado alimentario, tales como biodegradabilidad, actividad óptica y buenas propiedades de barrera (Villegas et al., citados por Aldas et al., 2017). Presenta mejores propiedades de barrera que el PET. En comparación con el polipropileno, el PHB es más rígido y frágil, menos resistente a los disolventes y tiene un alargamiento a la rotura muy bajo. El PHB se caracteriza por sufrir un proceso de postcristalización durante el almacenamiento, lo que origina poros en la superficie, afectando de manera negativa al alargamiento a la rotura del material (Hong, Hsu y Ye, citados por Aldas et al., 2017). Sin embargo, el PHB muestra mayor resistencia a la luz ultra violeta y mayor exclusión de oxígeno. Para facilitar la transformación y mejorar las propiedades del PHB, se puede mezclar con otros polímeros que permitan disminuir su cristalización como el PLA, o con otros polímeros aún más flexibles como el PCL. La incorporación de un plastificante en el PHB retrasa el proceso de envejecimiento de la matriz polimérica. También se puede modificar las propiedades del PHB mediante la interrupción de la matriz polimérica incorporando poli(hidroxivalerato) (PHV) para dar lugar al copolímero de PHB y PHV, conocido como poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalerato) o PHBV. Esta copolimerización da lugar a un biopolímero con mejor tasa de cristalización y una menor temperatura de fusión que el PHB. El PHBV puede ser

sintetizado de forma natural mediante las rutas metabólicas de microorganismos como *Azotobacter vinelandii* (Oliva, 2012).

5.2. TENDENCIAS EN LA INVESTIGACIÓN DE NUEVOS ENVASES BIODEGRADABLES

La necesidad de igualar las propiedades de los materiales biodegradables a las de los plásticos sintéticos convencionales centra todos los esfuerzos de las organizaciones, empresas y productores del mundo del envasado y del embalaje. Algunas instituciones de referencia en el campo de la innovación en los envases alimentarios como el Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE) o el Observatorio del Envase del Futuro, fundado por Ecoembes y AINIA, coinciden en las tendencias que caracterizan el futuro del envasado de alimentos. Estas tendencias se basan en la sostenibilidad, ya que cada vez son más las empresas que centran sus esfuerzos y recursos en la introducción de nuevas formas de envasar sus productos de una manera más respetuosa con el medioambiente. Este fenómeno es debido a los cambios que se están produciendo, y se acabarán implantando en un futuro en la regulación del uso y empleo de los nuevos materiales destinados a entrar en contacto con los alimentos. Estos están siendo evaluados, aprobados y, finalmente, dictados y publicados por los organismos institucionales.

La comunidad científica estudia múltiples formas de introducir nuevos materiales e innovadoras estrategias en la producción de envases y embalajes, y existen dos tendencias claras en el campo de la investigación: el uso de la nanotecnología para la producción de bionanocompuestos y los envases comestibles.

5.2.1. Bionanocompuestos

La nanotecnología es un nuevo y excitante campo de investigación que permitirá transformar la industria alimentaria, cambiando el proceso de producción, envasado y consumo de los alimentos. Puede otorgar mejores propiedades físico-químicas a los envases biodegradables, adicionar aditivos antimicrobianos y antioxidantes mediante el empleo de nanocompuestos o mejorar las características nutricionales y funcionales de los alimentos. Esta ciencia se aplica a nivel molecular, ya que permite la obtención de diversos componentes a escala nanométrica, los cuales ya se usan en la actualidad en investigaciones sobre films biodegradables, recubrimientos comestibles, envases activos e inteligentes (Huamán, Lavado y Paucar, 2020).

Estas mejoras en las características de los biopolímeros destinados a la producción de envases alimentarios se basan en el uso de bionanocompuestos, sustancias obtenidas mediante nanotecnología, de fuentes renovables similares a las de los materiales biodegradables vistos anteriormente. En concreto, este campo de estudio se centra en aquellos bionanocompuestos que mejoran las propiedades de los envases producidos por polímeros biodegradables, conocidos como nanorefuerzos o nanorelentos. Los nanorefuerzos se obtienen introduciendo un nanocompuesto en la matriz de un polímero para que la estructura del primero se intercale con la del segundo. Este proceso se puede producir, por ejemplo, por intercalación de fusión o de solución, siendo preferible el primero por su versatilidad evitando el uso de disolventes (Maftoonazad y Ramaswamy, 2018). De esta forma, los nanorefuerzos brindan a los biopolímeros propiedades diferentes o mejoradas para el uso previsto. Uno de los nanorefuerzos más estudiados son los nanorelentos de celulosa (nanocelulosa o nanocristales de celulosa), los cuales se han descrito anteriormente en este trabajo. Las nanoestructuras de carbono engloban al fullereno, los nanotubos de carbono de pared simple y compuesta, las nanofibras de carbono y nanoláminas de grafeno. El uso de estos compuestos como nanorelento otorga mayor estabilidad térmica a la mezcla, e incrementa las propiedades mecánicas y elásticas de los bioplásticos en los que se introducen (Cruz et al., 2017). Las nanoarcillas, o capas de silicato laminadas son los nanocompuestos más empleados en la formación de nanorefuerzos. Algunos de los más estudiados son la montmorillonita o la saponita. La presencia de estos nanocompuestos, según Huamán, Lavado y Paucar (2018), mejora la compatibilidad de la matriz, al mejorarse las propiedades de tracción y las interacciones entre las distintas láminas. La biodegradabilidad de los nanocompuestos es una de las principales preocupaciones que atañen a este estudio. Dado que la principal razón del uso de biopolímeros como matrices para la intercalación de los bionanocompuestos es su biodegradabilidad, se espera que estos últimos no comprometan la biodegradabilidad del producto final. Por tanto, se debe tener en cuenta que la capacidad de los bionanocompuestos para degradarse depende de su composición química, de la matriz y del material de relleno.

Las investigaciones y los proyectos llevados a cabo, o en los que colabora ITENE, constituyen probablemente los avances más importantes en el ámbito de la investigación nacional relacionada con los materiales y sistemas de envasado y embalaje. Este centro está declarado como entidad de utilidad pública por la legislación española, es una unidad asociada del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), y cuenta con la certificación de AENOR en base a la norma UNE-ISO/IEC 27001:2014 para el sistema de seguridad de la información que da soporte a la investigación científica y desarrollo de proyectos I+D+i. Entre sus múltiples infraestructuras dedicadas a la investigación, poseen la planta de desarrollo de nanorefuerzos, una infraestructura orientada a

optimizar y sintetizar nanocompuestos a partir de materia base, así como el escalado para su uso industrial y las pruebas de los nanomateriales para su uso en envases. Actualmente, ITENE desarrolla múltiples proyectos, de entre los que destacan BOOCELL, un proyecto respaldado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, para desarrollar nuevos materiales sostenibles y reemplazar a los plásticos sintéticos en aplicaciones de embalaje. VALQUIBIO, un proyecto respaldado por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial para el desarrollo de un sistema integrado que explore la sinergia de procesos químicos y de bioconversión para la valorización de envases no reciclados. O el proyecto BioNanoPolys, que trata de crear una red de plantas piloto y otros servicios para acelerar la introducción en el mercado de materiales biobasados con nanopartículas.

5.2.2 Envases comestibles

El envasado comestible surge como una idea alternativa al envasado de productos alimentarios, que intenta ir un paso más allá en la implantación y crecimiento del uso de envases biodegradables en la industria alimentaria. Los materiales destinados a este tipo de uso no solo suponen una idea con gran potencial para el envasado de determinados alimentos, sino que además pueden proporcionar mejoras del valor nutricional y de la vida útil del producto, y de las propiedades químicas, mecánicas y de degradabilidad del sistema de envasado (Kumar et al., 2021). Muchos de los materiales bioplásticos vistos anteriormente, destinados a la producción de envases biodegradables, poseen además la ventaja de ser comestibles, a diferencia de los plásticos de origen petroquímico usados en la industria del envasado convencional. Con respecto a los envases comestibles, se puede diferenciar entre los recubrimientos y las películas. Ambos están en contacto directo con el alimento, y se consumen de manera conjunta, pero se distinguen en la forma de aplicación sobre la superficie del producto (López, 2013). Los revestimientos se suelen encontrar en fase líquida, y es el alimento el que se sumerge en dicha solución con capacidad filmogénica. Las películas constituyen láminas sólidas que se aplican posteriormente sobre el alimento a modo de envoltura (Alamilla, Jiménez y Solano, 2018).

Los envases comestibles pueden ser aplicados en la mayoría de los grupos de alimentos, generalmente combinados con otras tecnologías de conservación como la deshidratación, refrigeración o el empleo de atmósferas modificadas. Esta combinación persigue, como cualquier envase, el objetivo de mejorar la calidad y seguridad del producto alimentario, aportando diferentes características y funciones en base al material de envasado elegido. Algunos envases comestibles pueden solucionar un problema común de muchos alimentos envasados, como es la pérdida de agua. Por ejemplo, la cobertura comercial *Seal gum*, *spray gum*TM a base de ésteres de sacarosa se puede emplear para reducir la pérdida de humedad en frutas frescas cortadas (Pavlath y Orts, citados por López, 2013). Otros se

centran en mantener o mejorar las propiedades organolépticas de los alimentos. Poniendo como ejemplo el glaseado de los donuts, es común que este desaparezca por fundición o porque el producto absorbe humedad, por lo que este glaseado se puede combinar con materiales como el agar o kappa-carragenanos para mantener la cobertura de azúcar y, por ende, el aspecto y sabor de los donuts. Los recubrimientos también pueden emplearse como protección mecánica en productos individuales que se comercializan envasados en gran número, como algunos frutos secos o productos a base de chocolate. En este caso, determinados materiales como la goma laca o goma *shellac* se usan como recubrimientos de dichos productos para evitar daños o rasguños durante su manipulación y comercio (Kramer, citado por López, 2013). Otras veces, estos envases comestibles suponen un modo de contención y cobertura simple de alimentos cotidianos, que han sido aplicados desde hace décadas. Por ejemplo, el uso de tripas o envolturas de colágeno para la contención de productos cárnicos como las salchichas u otros productos picados a base de carne o de vegetales.

Los materiales utilizados en la preparación de recubrimientos y películas proceden de diversas fuentes del reino animal y vegetal, tanto terrestre como marino, así como procedentes de los microorganismos (Tharanathan, citado por López, 2013). La naturaleza de estos compuestos es muy variada, siendo principalmente de origen proteico (gelatina, proteína del suero de la leche, zeína, gluten, proteína de soja, etc.), lipídico (ceras, grasas, aceites) o polisacáridos (celulosa, gomas, almidón, quitosano, agar, pectinas, etc.).

La nanotecnología también puede jugar un papel importante en la concepción y síntesis de envases comestibles. Los envases con características modificadas y estructuradas a nanoescala muestran propiedades químicas, físicas y biológicas diferentes a los no modificados, lo que se manifiesta directamente en el modo de conservación y empleo del alimento. La nanotecnología se puede emplear de diversas formas en la producción de recubrimientos y películas, como la técnica del nanolaminado, que consiste en la aglomeración de nanocapas de uno o diferentes materiales de distinta composición o propiedades, ofreciendo ventajas en la preparación de recubrimientos comestibles como una mejor cobertura o textura del alimento, encapsulación de saborizantes, antimicrobianos, aditivos, etc (Minko, Motornov y Tokarev, citados por Alamilla, Jiménez y Solano, 2018). Algunos nanocompuestos basados en metales como el cobre, el zinc y el titanio son seguros, y pueden ser utilizados como nanorellenos en el multilaminado de los envases comestibles. Estos mejoran las propiedades de barrera y disminuyen la fotodegradación, además de presentar cierta actividad bacteriostática. (Gruére, citado por Alamilla, Jiménez y Solano, 2018).

5.3 REGULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE MATERIALES PARA LA CONFECCIÓN DE NUEVOS ENVASES

Como ocurre en todos los sectores, el avance de la tecnología se desarrolla más rápido que la capacidad de regulación del mismo dentro del marco legal de la comunidad. Con respecto al sector del envasado alimentario, la regulación de los objetos y materiales destinados a entrar en contacto con los alimentos se contempla en el Reglamento 1935/2004 del veintisiete de octubre. Teniendo en cuenta las especificaciones y requisitos necesarios para que una sustancia pueda establecer contacto con los alimentos, dicho Reglamento establece en el artículo 5, que la Comisión puede adoptar y modificar medidas específicas respecto de los grupos de materiales y objetos enumerados en el Anexo I, combinaciones de dichos materiales, o materiales u objetos reciclados utilizados en la fabricación de los materiales y objetos referidos. En este punto toma importancia el Reglamento 10/2011 del catorce de enero sobre materiales y objetos plásticos destinados a entrar en contacto con los alimentos, el cual constituye una de estas medidas específicas. En el anexo I de dicho Reglamento está presente una lista de la unión de monómeros, otras sustancias de partida, macromoléculas obtenidas por fermentación microbiana, aditivos y auxiliares cuyo uso para la producción de materiales destinados a entrar en contacto con los alimentos está permitido. Dentro de esta lista se puede observar la presencia de algunos de los polímeros biodegradables tratados anteriormente. Del grupo de los biopolímeros generados a partir de biomasa, la mayoría de las sustancias aprobadas solo pueden emplearse como aditivos o auxiliares, como son las grasas y aceites de origen alimentario animal o vegetal, sus ácidos grasos, la cera de abejas, la pectina o la caseína. Pero también hay algunos que pueden ser empleados como monómeros u otras sustancias de partida para la confección de envases, como la albúmina, la glucosa o sacarosa, la celulosa y el almidón de calidad alimentaria, y el aceite de soja.

Solo el copolímero de los ácidos 3-hidroxi-butanoico y 3-hidroxi-pentanoico está contemplado como sustancia autorizada formada por fermentación microbiana, especificándose además la cepa y método de obtención y conservación empleados. Por lo que los biopolímeros tratados en el estudio quedan fuera de la lista.

Los principales componentes de los polímeros producidos por la síntesis de monómeros si se encuentran dentro de la lista, como son el 1.4-butanodiol, etilenglicol, tereftalato de dimetilo y los ácidos adípicos, tereftálicos y succínicos, que pueden usarse como monómeros y sustancias de partida. También están aprobados el ácido láctico del que se obtiene el PLA y la caprolactona que es modificada para la síntesis de PCL. Sin embargo, no se declara nada al respecto de las modificaciones que se les puede aplicar o de las mezclas entre ellos para la síntesis de los polímeros biodegradables anteriormente caracterizados en este estudio.

Muchos de los biopolímeros existentes están siendo investigados por la Asociación Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), o ya han sido validados por esta y se encuentran pendientes de actualización de la lista de sustancias permitidas. No obstante, el proceso de inclusión de una sustancia pasa por una serie de pasos que implican mucho tiempo. Este proceso se describe en los artículos 8, 9, 10 y 11 del Reglamento 1935/2004. En resumen, para la autorización de cualquier nueva sustancia, se debe presentar una solicitud a la autoridad competente de cualquier Estado miembro. Esta informa a EFSA y pone a su disposición toda la información facilitada por el solicitante, que hace lo mismo con la Comisión y el resto de los Estados miembros. En un plazo de seis meses que se puede prolongar, EFSA emite un dictamen sobre si, en las condiciones de uso previstas del material u objeto en que se utiliza, la sustancia cumple con los requisitos de seguridad establecidos en el mismo Reglamento. Este dictamen se presenta a la Comisión, a los Estados miembros y al solicitante. Finalmente, y si el dictamen es válido, la autorización comunitaria de la sustancia se realiza mediante la adopción de una medida específica por parte de la Comisión.

Todo esto supone un obstáculo más en el establecimiento de alternativas al sistema de envasado que está implantado en la actualidad. Sin embargo, si existe un marco regulatorio para la recogida y el tratamiento de los materiales ya aprobados legalmente que confeccionan los envases, así como para los residuos de estos últimos. La Ley 11/1997 del veinticuatro de abril, sobre envases y residuos de envases, tiene como objetivo prevenir y reducir el impacto medioambiental de los envases y la gestión de los residuos que generan a lo largo de todo su ciclo de vida. Esta Ley recoge una serie de objetivos de reducción, reciclado y valorización para los envases y sus residuos producidos, los cuales se cumplen a través de la implantación de sistemas integrados de gestión. Estos sistemas tienen como finalidad la recogida periódica de envases usados y sus residuos, en el domicilio del consumidor o sus proximidades, responsabilidad que recae en las Entidades locales en función de los convenios establecidos. Ésta recogida debe ser selectiva en función de los envases y los residuos de envases. También se encargan del transporte hasta los centros de separación y clasificación o, en su caso, directamente a los centros de reciclado o valorización. Los centros mencionados se regentan por un agente económico para la reutilización de los envases y residuos, o son transportados a un recuperador, reciclador o valorizador autorizados. Los residuos de envases y envases usados devueltos o recogidos deben ser almacenados y manipulados de manera que quede garantizada la protección del medio ambiente, la salud pública y la seguridad de los consumidores. Los agentes económicos deben proporcionar a las Comunidades autónomas, respecto de las operaciones realizadas, la información necesaria para la comprobación del cumplimiento de los objetivos de la presente Ley, referentes a la reducción y reciclado o valorización de los envases y sus residuos. El Programa Nacional de Residuos de Envases y Envases Usados, aprobado por el Gobierno español a propuesta del

Ministerio de Medio Ambiente, integra los programas de gestión de todas las comunidades autónomas y, en su caso, los de las Entidades locales. En este se especifican las determinaciones sobre la gestión de envases y de residuos de envases, y se establecen medidas que permitan la participación de todos los organismos nombrados en el seguimiento del Programa y el cumplimiento de los objetivos.

Haciendo hincapié en los procesos de valorización de los envases y residuos

de envases, toma relevancia los procesos de compostaje y de biodegradación de estos materiales. Estas operaciones están reguladas, como ya se ha visto anteriormente, por la norma UNE-EN 13432:2001 que establece los requisitos y criterios de evaluación y aceptación de los envases. La norma UNE-EN 13431:2005 establece los requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante recuperación de energía. La norma UNE-EN 13430:2005, los requisitos para envases y embalajes recuperables mediante reciclado de materiales, o la norma UNE-EN 14046:2003, que establece la evaluación de la biodegradabilidad aeróbica última y de la desintegración de los materiales de envase y de embalaje, bajo condiciones controladas de formación de compost.

5.4. DESARROLLO DE PROTOCOLOS DE SELECCIÓN DE ENVASES EN BASE A SU ADECUACIÓN

Como ocurre con el empleo de los plásticos convencionales para el envasado de productos alimentarios, estos se seleccionan en función de las propiedades que presentan, y que mejor se ajustan a la naturaleza y condiciones del alimento que contienen. De igual forma, los protocolos de selección de materiales biodegradables a emplear para la producción de diferentes envases, se basan en las características que estos presentan. Por tanto, los protocolos de selección diseñados definen las principales propiedades deseables de los materiales para las operaciones de envasado, y se comparan con las de los plásticos sintéticos para establecer su adecuación. Estos protocolos seleccionan algunos de los materiales vistos anteriormente en el estudio.

Material	Densidad (g / cm ³)	Módulo de tracción (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Estrés último (%)	T ^a de transición vítrea (°C)	T ^a de fusión (°C)	Coefficiente de transmisión de vapor (g/m ² /dia): 38 °C, 90% HR	Coefficiente de transmisión de oxígeno (cc/m ² /dia): 25 °C, 0% HR
TPS	-	-	4,8 - 8,5	35 - 100	25 - 80	160	7,78 - 9	12,11
Celulosa	1,5	-	13 - 59	4,1 - 10	-	256	4,59 - 9	390
Gelatina	-	-	17,46	35 - 100	25 - 80	150 - 160	290,64	-
PLA	1,25	0,35 - 3,5	21 - 60	2,5 - 30,7	45 - 60	162	0,303 - 0,4	30,7
PCL	1,15	0,21 - 0,44	20,7 - 42	300 - 1000	60	65	20 - 25	700 - 800
PBS	-	-	40	150	-	90 - 120	2200 - 2300	1,72 - 2
PHB	1,26	3,5 - 4	40	5 - 8,1	5 - 14,9	182	1,16	183
LDPE	0,93	0,14 - 0,3	7,17	20 - 900	120	109 - 115	16 - 23	7000 - 8500
PET	1,4	50	3	50 - 300	80	245 - 250	32	130
PP	0,9	-	40 - 50	100	-	160	9,3 - 11	2300 - 3100
PS	1,05	-	22	36,7	-	90	79 - 340	320 - 400
PVC	1,42	-	46 - 52	25,9	-	75 - 105	150 - 200	8 - 150

TPS; almidón termoplástico, LDPE; polietileno de baja densidad, PET; tereftalato de polietileno, PP; polipropileno, PS; poliestireno, PVC; cloruro de polivinilo

Tabla 1. Propiedades mecánicas y térmicas de distintos materiales (Aggarwal, Shaikh y Yaqoob, 2021; Attkan et al, 2021)

La tabla 1. muestra diferentes parámetros que establecen qué características presentan los materiales, clasificados por colores en plásticos biodegradables (verde) y convencionales o sintéticos (gris), de mayor interés en la industria alimentaria. Muchos materiales biodegradables tienen propiedades muy similares a las de algunos plásticos sintéticos que se emplean en la industria del envasado, e incluso se pueden obtener mejores prestaciones para tal fin. Por ejemplo, el PLA ofrece propiedades mecánicas muy similares a las de los plásticos, pudiéndose emplear como una alternativa para la producción de bandejas desechables o bolsas. El PCL tiene muy buena resistencia de alargamiento hasta la rotura, llegando a ser superior a la de cualquier plástico convencional citado. Esto lo hace muy útil para determinadas aplicaciones en la industria del envasado, como recubrimiento de envases, films o bolsas. El PHB presenta una resistencia a la tracción superior a la de la mayoría de los plásticos, siendo también una alternativa viable para la fabricación de envases rígidos o botellas, con el único inconveniente de que no es tan transparente como puede serlo el PET, u otras alternativas biodegradables como el PLA.

Se debe concluir que, aunque los materiales procedentes de biomasa como la celulosa o la gelatina, no poseen propiedades que puedan competir con la del resto de plásticos biodegradables o sintéticos, estos presentan otras ventajas como son el precio o el grado de biodegradabilidad ya que, al obtenerse principalmente de desechos agroindustriales, su recogida y fabricación abarata los costes de producción, y pueden degradarse en la mayoría de ecosistemas como materia orgánica.

6. CONCLUSIONES / CONCLUSIONS

- La sociedad es plenamente consciente del efecto adverso que el uso desmedido de envases plásticos provoca en el planeta. La industria petroquímica del sector del envasado y el embalaje, junto con el uso que hace el consumidor de los productos alimentarios conlleva consecuencias negativas para el medio ambiente y la salud pública.
- En la actualidad, ya existen alternativas más sostenibles con el medio ambiente que los envases y embalajes estandarizados dentro del sector agroalimentario. Incluso existen opciones totalmente respetuosas con el medio ambiente que no conllevan efecto adverso alguno.
- La falta de regulación por parte de los organismos públicos competentes, y los intereses económicos que giran alrededor del negocio de la industria plástica retrasan la introducción de dichas alternativas en el mercado de los alimentos.
- El estudio e investigación de los materiales propuestos como una alternativa biodegradable para la confección de envases son prometedores. Se obtienen envases y otros objetos con interesantes propiedades para la contención y protección de los alimentos, pero todavía no se ha igualado la funcionalidad de los plásticos convencionales.
- El precio final del producto sigue siendo el principal factor de peso a la hora de elegir entre un alimento u otro, independientemente del envase y embalaje que lo contenga. Por tanto, es imposible lograr la introducción total de todas las alternativas biodegradables existentes, hasta que éstas iguallen en precio y funcionalidad a los productos con el modelo de envase actual.

- Society is fully aware of the adverse effect that the excessive use of plastic containers causes on the planet. The petrochemical industry in the packaging sector, together with the consumer's use of food products, has negative consequences for the environment and public health.
- Nowadays, there are already more environmentally sustainable alternatives than the actual food packaging within the agri-food sector. There are even totally environmentally friendly options that do not entail any adverse effects.
- The lack of regulation by the competent public institutions, and the economic interests that revolve around the business of the plastic industry delay the introduction of these alternatives in the food market.

- The study and investigation of the materials proposed as a biodegradable alternative for packaging are promising. Containers and other objects with interesting properties for the containment and protection of food are obtained, but the functionality of conventional plastics has not yet been matched.
- The final price of the product continues to be the main weight factor when choosing between one food or another, regardless of the container and packaging that contains it. Therefore, it is impossible to achieve the total introduction of all the existing biodegradable alternatives, until these are equal in price and functionality to the products with the current packaging model.

7. VALORACIÓN PERSONAL

Realizar un Trabajo de Fin de Grado en modalidad de revisión bibliográfica, sobre un tema tan polémico y de gran importancia en el futuro de la sociedad, ha despertado un gran sentimiento de concienciación en mí. Intentando alejarme de los estereotipos de una valoración personal, me gustaría poder plasmar por escrito la relevancia que, a día de hoy, el uso desmedido que se hace de los plásticos de envasado y embalaje tiene hoy en mi vida. Sinceramente, espero poder contribuir en un futuro, con mis esfuerzos, a crear una comunidad más concienciada con el impacto negativo que el sistema actual de envasado en la industria agroalimentaria genera, y poder colaborar en mi ámbito profesional a la introducción de cualquier material biodegradable en el mercado, o al desarrollo de nuevas ideas y tecnologías que ofrezcan, finalmente, una solución al daño que estamos provocando al planeta y a la salud de todos los seres vivos.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Abdul Khalil, H. Banerjee, A. Karim, A. Mohamed, A. Paridah, M. Rizal, S. Saurabh, C. Suriani, A y Tye, Y. (2018). "Biodegradable Films for Fruits and Vegetables Packaging Application: Preparation and Properties". *Food Engineering Reviews*, vol. 10, no. 3, pp. 139-153. doi: 10.1007/s12393-018-9180-3.
2. Ahvenainen, R. (2003). *Novel Food Packaging techniques*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited
3. Aldas, M., Arrieta, M., Balart, R., Ferri, J.M., García, D. y López, J. (2017). "Polihidroxibutirato: un termoplástico biobasado y biodegradable con interés industrial". *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, 113(723), pp. 11-16. Disponible en:

<https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsdnp&AN=edsdp.6038278ART&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 18-01-2022].

4. Ali, F.B y Mohan, R. (2010). "Thermal, mechanical and rheological properties of biodegradable polybutylene succinate / carbon nanotubes nanocomposites". *Polymers Composites*, 31(8), pp. 1309-1314. doi: 10.1002/pc.20913
5. Amaya, J. B. (2018). "Estudio de la degradabilidad del PCL (policaprolactona) dosificado con la lignina de la fibra de banano". *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 19(4), pp. 128–141. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsdnp&AN=edsdp.6512678ART&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 17-01-2022]
6. Amazon (2022). Amazon. Disponible en: <https://sostenibilidad.aboutamazon.es/medio-ambiente/economia-circular/embalaje> [Consultado 14-01-2022]
7. Ariza, W. Bonilla, S. Contreras, F. Cruz, A. y Rivera, C. (2019) "Los empaques biodegradables, una respuesta a la conciencia ambiental de los consumidores". *Current Research in ResearchGate*. doi: 10.5337/reuca.v0i7.7830
8. Asociación Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (2021). Seguridad alimentaria: Gestión de riesgos, seguridad química, materiales en contacto con los alimentos. Madrid: AESAN.
9. Attkan, A.K. Birania, S. Kumar, N. Kumar, R. Kumar, S. Panghal, A.K. y Rohilla, P. (2021). "Advances in development of biodegradable food packaging material from agricultural and agro-industry waste". *Journal of Food Process Engineering*, 45(1). doi:10.1111/jfpe.13930.
10. Auras, R.A., Singh, S.P Y Singh, J.J. (2005). "Evaluation of oriented poly(lactide) polymer vs existing PET and oriented PS for fresh food service containers". *Packaging Technology and Science*, 18(4), pp. 207-216. doi: 10.1002/pts.692
11. Ávalos Belmonte, F. Salazar Sánchez, M.R. Cañas Montoya, J.A. Villada Castillo, H.S. Solanilla Duque, J.F y Rodríguez Herrera (2020). "Biogenerated polymers: an environmental alternative: Polímeros biogenerados: una alternativa medioambiental". *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, 87(214), pp. 75–84. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsdnp&AN=edsdp.7556850ART&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 18-01-2022]
12. Basha, R.K., Konno, K., Kani, H. y Kimura, T. (2011). "Water vapor transmission rate of biomass based film materials". *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 4(2), pp. 37-42. doi: 10.1016/S1881-8366(11)80018-2

13. Bugusu, B. y Marsh, K. (2007). "Food packaging- roles, materials, and environmental issues" and environmental issues". *Journal of Food Science*, 72(3), p. 39. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsgao&AN=edsgcl.166218053&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 11-01-2022]
14. Calva-Estrada, S. J., Jiménez-Fernández, M. y Lugo-Cervantes, E. (2019). "Protein-Based Films: Advances in the Development of Biomaterials Applicable to Food Packaging". *Food Engineering Reviews*, 11(2), pp. 78–92. doi: 10.1007/s12393-019-09189-w.
15. Candia Balseiro, D. (2018). *Desarrollo de films obtenidos con hidrocoloides modificados por nanoarcilla y radiación ultravioleta*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
16. Cruz, R.G. Hernández, F.J. Landa, P. y Reséndiz, V. (2018). "NANOTECNOLOGÍA EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA: BIONANOCOMPUESTOS EN EMPAQUES DE ALIMENTICIOS". *Agro Productividad*, 10(10). Disponible en: <https://revistaagroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/91> [Consultado 06-01-2022]
17. Devís, A. y Gallur, M. (2013). "Bioplásticos: Últimas tendencias en el envase alimentario". *Plásticos Universales*, (163-176), pp. 84–90. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsdnp&AN=edsdnp.4390711ART&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 11-01-2022]
18. Duque-Acevedo, M. Belmonte-Urena, L. Cortés-García, F y Camacho-Ferre, F. (2020). "Residuos agrícolas: Revisión de la evolución, enfoques y perspectivas sobre usos alimentarios". *Ecología global y conservación*, 22, e00902. Disponible en: <https://doi.org/cuarzo.unizar.es:9443/10.1016/j.gecco.2020.e0090> [Consultado 14-01-2022]
19. Ecoembes (2022). The Circular Lab. Disponible en: <https://www.thecircularlab.com/> [Consultado 14-01-2022]
20. Ecology: El Diario Ecológico de Perú. (2018). "PHA: Polímeros producidos por bacterias biodegradables que sustituirán a los plásticos convencionales". Ecology [Blog]. 16 de julio. Disponible en: <https://ecology.wordpress.com/2018/07/16/pha-polimeros-producidos-por-bacterias-biodegradables-que-sustituiran-a-los-plasticos-convencionales/> [Consultado 17-01-2022]
21. España. Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. Boletín Oficial del Estado, de 25 de abril de 1997 (99), 13270-13277
22. Europa. Reglamento (CE) nº 1935/2004 sobre los materiales y objetos destinados a entrar en contacto con alimentos y por el que se derogan las Directivas 80/590/CEE y 89/109/CEE. Boletín Oficial del Estado, de 27 de octubre de 2004 (338), 4-17

23. Europa. Reglamento (UE) nº 10/2011 sobre materiales y objetos plásticos destinados a entrar en contacto con alimentos. Boletín Oficial del Estado, de 14 de enero de 2011 (12), 1-89
24. European Bioplastics (2022). EuropeanBioPlastics. Disponible en: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/biodegradable/> [Consultado en 07-01-2022]
25. Ghanbarzadeh, B. y Oromiehi, A. (2008). "Biodegradable biocomposite films based on whey protein and zein: Barrier, mechanical properties and AFM analysis". *International Journal of Biological Macromolecules*, 43(2), pp. 209–215. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2008.05.006.
26. Huamán, J. Lavado, A. y Paucar, L. (2020). "La nanotecnología en el desarrollo de envases para alimentos: Una supertecnología que afronta con éxito los desafíos actuales del envasado y amigable con el medio ambiente". *Agroindustrial Science*, 10 (2), pp. 211-217. Disponible en: <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.02.12> [Consultado 06-01-2022].
27. Hubbe, M.A. Lucia, L.A. Rojas, O.J y Sain, M. (2008). "Cellulosic Nanocomposites: A review". *BioResources*, 3(3), pp. 929–980. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsdoj&AN=edsdoj.89de742daab48e5afc0d2b709674491&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 17-01-2022]
28. ITENE (2022). Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística. Disponible en: <https://www.itene.com/proyectos-de-difusion-abierta> [Consultado 06-01-2022].
29. Jiménez, M. J. Jordá, M. y Ortuño, N. (2019). "Propuestas para mejorar la sostenibilidad de los envases alimentarios". *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, 117(746), p. 2. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsdnp&AN=edsdnp.6992444ART&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 06-01-2022]
30. Kanthak, M. y Söling, F. (2012). "Analysis of the use of compostable Ecovio R organic waste bags". *Müll und Afball* 8(12), pp. 402-404. Disponible en: "Analysis of the use of compostable Ecovio R organic waste bags". *Müll und Afball* 8(12), pp. 402-404. Disponible en: https://plasticsrubber.basf.com/global/en/performance_polymers/downloads.html#%7B%20%22%3A%5B%5B%22productId%22%2C%5B%22%2F8796479193230%22%5D%5D%5D%2C%22page%22%3A%220%22%2C%22id%22%3A%22result-0%22%7D [Consultado 17-01-2022]
31. Kanwal, A., Jia, H., Li, C., Weng, Y., Zhang, M. y Zhao, Y. (2021). "Degradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) by *Stenotrophomonas* sp. YCJ1 isolated from farmland soil". *Journal of Environmental Sciences*, 103, pp. 50–58. doi: 10.1016/j.jes.2020.10.001

32. Kumar, P. Madhavi, J. Murugaiyan, J. Rao, M. Shakya, S y Verma, M (2021). "Trends in packaging material for food products: historical background, current scenario, and future prospects". *Journal of Food Science and Technology*, vol. 58, no. 11, pp. 4069–4082. doi: 10.1007/s13197-021-04964-2.
33. Laura, M. Marian, V. Stoica, D. y Stoica, M. (2020). "The financial impact of replacing plastic packaging by biodegradable biopolymers. A smart solution for the food industry". *Journal of Cleaner Production*, vol. 277. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124013.
34. Liu, W., Peng, Z., Qingsheng, W. y Jie, R. (2010). "Preparation, Mechanical, and Thermal Properties of Biodegradable Polyesters/Poly(Lactic Acid) Blends", *Journal of Nanomaterials*, vol. 2010, ArticleID 287082, p. 8. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2010/287082> [Consultado 18-01-2022]
35. López de Lacey, A. M. (2012). "Diseño, desarrollo y aplicación de envases comestibles potencialmente bioactivos". Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
36. Moire, L., Rezzonico, E. y Poirier, Y. (2003). "Synthesis of novel biomaterials in plants". *Journal of Plant Physiology*. 160(7), pp. 831-839. doi: 10.1078/0176-1617-01030
37. Oliva Civera, G. (2012). *Plásticos biodegradables*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Zaragoza.
38. Pack&Bio (2022). Envases biodegradables. Disponible en: envasesbiodegradables.es/#inicio. [Consultado en 07-01-2022]
39. Plasticomanía (2022). Plasticomanía. Disponible en: <https://www.plasticomania.com/blog/tipos-de-envases-biodegradables/> [Consultado en 07-01-2022]
40. Perdonés, Á. Escriche, I. Chiralt, A y Vargas, M. (2016). "Efecto de los recubrimientos de aceite esencial de quitosano y limón en el perfil volátil de las fresas durante el almacenamiento". *Química de los alimentos*, 197, pp. 979-986. Disponible en: [https://doi-org.cuarzo.unizar.es:9443/10.1016/j.foodchem.2015.11.054](https://doi.org.cuarzo.unizar.es:9443/10.1016/j.foodchem.2015.11.054) [Consultado 15-01-2022]
41. Sarasam, A., Krishnaswamy, R. y Madihally, S. (2006). "Blending chitosan with polycaprolactone: Effects on physicochemical and antibacterial properties". *BIOMACROMOLECULES*, 7(4), pp. 1131-1138. doi: 10.1021/bm050935d
42. Shaikh, S., Yaqoob, M. and Aggarwal, P. (2021). "An overview of biodegradable packaging in food industry", *Current Research in Food Science*, 4, pp. 503–520. doi: 10.1016/j.crfs.2021.07.005.

43. Siche, R. y Lizarraga, E. (2020). *Webinar: Desarrollo de envases biodegradables a partir de los residuos agroindustriales* [YouTube]. 23 de noviembre. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=tXVVVTafr9k>. [Consultado 11-01-2022]
44. Solano Doblado, L. G. (2018). "Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados: Functionalized edible films and coatings". *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 21(1), pp. 30–42. doi: 10.22201/fesz.23958723e.2018.0.153
45. Sorrentino, A., Gorrasi, G. y Vittoria, V. (2007). "Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications". *Trends in Food Science & Technology*, 18(2), pp. 84-95. DOI: 10.1016/j.tifs.2006.09.004
46. Tian, H.L., Wang, Z.P., Jia, S.L., Pan, H.O., Han, L.J., Bian, J.J., Li, Y., Yang, H.L. y Zhang, H.L. (2021). "Biodegradable Foaming Material of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)/Poly(propylene carbonate) (PPC)". *Chin J Polym Sci* 40, pp. 208–219. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10118-021-2644-6> [Consultado 18-01-2022]
47. Villa Morales, A. (2015). "Envases alimentarios basados en biopolímeros y técnicas aplicadas para la mejora de sus propiedades: Food packaging based on biopolymers and applier techniques for the enhancement of its properties". *Revista Doctorado UMH*, 1(1), p. 8. doi: 10.21134/doctumh.v1i1.881.
48. Villanueva, M. P. Benavent, E y Valera, M.P. (2018) 'Desarrollo de botellas de PBS biodegradables fabricadas por inyección-soplado para el envasado de zumo de naranja', *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, 115(735), pp, 5-10. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspxdirect=true&AuthType=sso&db=edsdnp&AN=edsdp.6473508ART&lang=es&site=eds-live&scope=site> [Consultado 17-01-2022]
49. Yu, G. Hung, C y Hsu, H. (2018). "An agricultural waste based composite to replace or reduce the use of plastics". *Revista Internacional de Ciencias Ambientales y Desarrollo*, 9 (7), pp. 167–172. Disponible en: <https://doiorg.cuarzo.unizar.es:9443/10.18178/ijesd.2018.9.7.1094> [Consultado 14-01-2022]
50. Zhang, H. y Sablani, S. (2021) 'Biodegradable packaging reinforced with plant-based food waste and by-products', *Current Opinion in Food Science*, 42, pp. 61–68. doi: 10.1016/j.cofs.2021.05.003.