

Revisión sistemática del estado del arte sobre los bioplásticos basados en almidón como material alternativo para la elaboración de empaques

María Andrea Pérez Hernández

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Viviana Sánchez Torres

Ingeniería Química, Ph.D.

Codirector

Fernando Viejo Abrante

Ciencias y Tecnología de los Materiales, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A todas las horas de sueño perdidas frente al pc (que no fueron en vano), a las salidas que rechacé por estudiar (o por mi cansancio físico y mental), a todos los momentos de caos que se convirtieron en buenas anécdotas para contar; a las sesiones de chistes, comidas y juegos con personas maravillosas que conocí desde el primer día que llegué a esta universidad; a todas las grandes enseñanzas que nunca olvidaré y me ayudaron a ser mi mejor versión, porque debido a ustedes tuve una aventura extraordinaria.

María Andrea Pérez Hernández

Agradecimientos

En esta página, expreso mi sincera gratitud hacia:

1. Mis padres, por enviarme todo su amor a través de comidas, extensas llamadas, darme un lugar digno donde vivir, estudiar, vivir momentos inolvidables y sobre todo confiar en mí desde que llegué a sus vidas de la mano de Dios.
2. Mi hermana, por escucharme todas las historias y anécdotas que le contaba antes de irnos a dormir, su apoyo incondicional, enviarme videos de Taylor, y mantenerme actualizada del mundo.
3. Mi abuela y mis tías, por responder ante mis llamados, entender mi punto de vista y enviarme bendiciones inmensas que las recibía a Km (comida también). Somos la prueba viviente de que las relaciones a distancia funcionan a la perfección con mucho amor de por medio.
4. Mi tío Eduardo por confiar en mí, ver mi potencial, ser de mis mayores admiradores y un excelente patrocinador.
5. Mis amigas de toda la vida Vane y Naty, que como ángeles que Dios me puso en el camino, me extendieron su mano tanto en momentos felices como de vulnerabilidad.
6. Mis directores de tesis por creer en mí, dedicarme un espacio de su tiempo y realizar aportes valiosos a estas páginas.
7. Las demás personas que el universo colocó en mi camino, para transmitirme conocimientos valiosos de la vida.

Por último, pero no menos importante, a mí misma porque con mi esfuerzo, disciplina, resiliencia, ganas de aprender y muchas otras cualidades que poseo, logré entrar a la universidad con una beca, culminar mis estudios y tener momentos inolvidables.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Marco Teórico.....	12
1.1 Plásticos tradicionales.....	12
1.2 Bioplásticos.....	13
1.3 Bioplásticos basados en almidón	14
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. Descripción metodológica	16
3.1 Consulta de la información.....	16
3.2 Selección de la información.....	16
3.3 Análisis de la Información	17
4. Análisis de resultados	18
4.1 Resultados de la consulta y selección de artículos.....	18
4.2 Estudio bibliométrico.....	19
4.3 Composición de bioplásticos basados en almidón.....	22
4.3.1 Plastificantes	24
4.3.2 Agentes reticulantes	26
4.3.3 Rellenos y otros bioplásticos	28
4.4 Métodos de producción de los bioplásticos basados en almidón.....	29
4.5 Biodegradabilidad de los bioplásticos	32

4.6 Aplicaciones en la industria de empaques	34
4.7 El futuro de los bioplásticos basados en almidón.	36
5. Conclusiones	37
Referencias Bibliográficas	39

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Número de resultados arrojados por la ecuación de búsqueda.	18
Tabla 2 Biodegradabilidad de algunos bioplásticos basados en almidón.	33
Tabla 3 Aplicaciones de los bioplásticos como sustituto de los polímeros tradicionales.	34
Tabla 4 Aplicaciones de los bioplásticos en empaques inteligentes.	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Esquema de la metodología desarrollada.	16
Figura 2 Proceso de selección de artículos según los criterios de elegibilidad establecidos.	19
Figura 3 Cantidad de artículos publicados por año.....	20
Figura 4 Número de artículos publicados por país.	21
Figura 5 Diagrama de número de artículos publicados de diferentes fuentes de almidón.	22
Figura 6 Esquema de la composición general de los bioplásticos basados en almidón.	24
Figura 7 Plastificantes utilizados en las investigaciones seleccionadas de bioplásticos basados en almidón.	25
Figura 8 Agentes reticulantes utilizados en las investigaciones seleccionadas de bioplásticos basados en almidón.	27
Figura 9 Porcentaje de los rellenos y otros bioplásticos utilizados en los estudios como complemento al almidón.....	29
Figura 10 Esquema de producción de los bioplásticos basados en almidón.....	31

Resumen

Título: Revisión sistemática del estado del arte sobre los bioplásticos basados en almidón como material alternativo para la elaboración de empaques *

Autor: María Andrea Pérez Hernández**

Palabras Clave: Bioplásticos, almidón, materiales.

Descripción: La disposición incorrecta de los plásticos provenientes en el medio ambiente, fuentes hídricas, vertederos o quemas genera altos niveles de contaminación a nivel mundial. Los plásticos de un solo uso como bolsas, contenedores de alimentos, entre otros empaques, son producidos y utilizados de forma masiva a diario y solo un mínimo porcentaje es reciclado. Por tal motivo, se han incrementado las investigaciones en los últimos años sobre los bioplásticos. Dependiendo de la materia prima que utilicen en su fabricación, estos nuevos materiales poseen la capacidad de biodegradarse en periodos cortos sin generar contaminación. Una de las materias primas más comunes es el almidón, que debido a su disponibilidad en la naturaleza puede ser extraído de diferentes fuentes como maíz, tubérculos, cáscaras y semillas de frutas. El almidón, en conjunto con plastificantes, reticulantes, rellenos y otros bioplásticos permite crear un material compuesto con características competitivas frente a los plásticos tradicionales en el mercado. En esta revisión sistemática de los bioplásticos basados en almidón, como alternativa para la producción de empaques se abarcan las tendencias en los estudios publicados hasta la fecha, innovaciones en las materias primas, proceso de producción, limitaciones en el campo de estudio y dirección de futuras investigaciones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química. Director: Viviana Sánchez Torres. Ingeniería Química, Ph.D . Codirector: Fernando Viejo Abrante. Ciencias y Tecnología de los Materiales, Ph.D.

Abstract

Title: Systematic review of the state of the art on starch-based bioplastics as an alternative material for packaging production *

Author(s): María Andrea Pérez Hernández**

Key Words: Bioplastics, starch, materials.

Description: The incorrect disposal of plastics from the environment, water sources, landfills or burning generates high levels of pollution worldwide. Single-use plastics such as bags, food containers, among other packaging, are produced and used massively on a daily basis and only a minimal percentage is recycled. For this reason, research on bioplastics has increased in recent years. Depending on the raw material used in their manufacture, these new materials have the ability to biodegrade in short periods without generating pollution. One of the most common raw materials is starch, which due to its availability in nature can be extracted from different sources such as corn, tubers, peels and fruit seeds. Starch, together with plasticizers, cross-linkers, fillers and other bioplastics, allows the creation of a composite material with competitive characteristics compared to traditional plastics on the market. This systematic review of starch-based bioplastics as an alternative for packaging production covers trends in studies published to date, innovations in raw materials, production process, limitations in the field of study and direction of future research.

* Degree Work

**Faculty of physical chemistry. School of Chemical Engineering. Chemical Engineering. Director: Viviana Sánchez Torres. Chemical Engineering, Ph.D . Codirector: Fernando Viejo Abrante. Science and Technology of Materials, Ph.D.

Introducción

Un plástico es un polímero, es decir, un material formado por la unión repetitiva de miles de átomos hasta formar macromoléculas (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018). En el 2021 la producción mundial de plástico fue 90,2% proveniente del petróleo, 8,3% de plástico reciclado post consumo y un 1,5% de bioplásticos (Plastics Europe, 2022). Los plásticos se emplean en la elaboración de muchos productos de uso frecuente como empaques, que corresponden a un envoltorio que tiene como función agrupar varios productos iguales en una sola unidad, es decir, en un solo paquete (Coordinadora, 2023).

La mayoría de empaques plásticos luego de ser utilizados, son depositados en el medio ambiente, vertederos de basura o enviados a quema, generando contaminación. Una vez depositados en el sitio, los plásticos se fragmentan en forma de micro y nano plásticos a través de procesos biológicos o fisicoquímicos. Dependiendo del tipo de polímero, puede demorar más de cien años en ocurrir este fenómeno, causando su acumulación. Este es el caso de las bolsas plásticas que, según la Cruz Roja, tardan aproximadamente 150 años en degradarse (Cruz Roja, 2021), mientras que los envases elaborados con PET y poliestireno expandido más de mil años (Fundacion AQUAE, 2021), siendo estos los empaques más comunes en el mercado.

Colombia no es ajeno a esta situación: según el periódico La República, la industria del plástico en Colombia creció un 22,2% en el primer semestre del 2021 frente al 2020, en donde los materiales más demandados fueron polietileno (39%), propileno (19,5%), policloruro de vinilo (16%), resinas de poli(etilentereftalato) PET (12,5%), poliestireno (6%), y otros polímeros (8%) (Gutiérrez, 2021). La mayoría son utilizados para fabricar plásticos de un solo uso como bolsas, rollos de embalaje, películas extensibles y de burbujas, envases de alimentos, vasos desechables, platos, bandejas, entre otros (GREENPEACE Colombia, 2019). Cabe

resaltar que, según la Revista Semana, la mayoría de los alimentos en los supermercados son ofrecidos en empaques plásticos, siendo algunos innecesarios, demostrando el consumo masivo de plásticos de un solo uso (Farfan, 2019). En el país sólo se recicla el 7% de este tipo de plásticos, lo que significa que se encuentra por debajo del promedio mundial (Carlos Losada, 2022), generando un impacto ambiental negativo.

Como resultado, muchos países e investigadores se han centrado en la creación de bioplásticos como reemplazo de los plásticos tradicionales. Este material polimérico proviene de productos biológicos como el almidón, que es extraído de tubérculos, granos, semillas y frutas. Según la Federación Colombiana de Productores de Papa (Fedepapa), en el Departamento de Cundinamarca se comercializaron alrededor de 280 mil toneladas de papa en 2022 para consumo (Fedepapa, 2022); mientras que de yuca y maíz se produjeron 2,5 y 1,5 millones de toneladas, respectivamente (MinAgricultura, 2021), por ende, estas materias primas son altamente cultivadas en el país y pueden ser una buena alternativa en la producción de bioplásticos.

Por tal motivo, es necesario conocer las investigaciones que han sido realizadas en torno a los bioplásticos basados en almidón, los métodos de producción y sus aplicaciones en la industria. Para ello, en esta investigación se elaboró una revisión sistemática del estado del arte existente en los últimos 10 años, aplicando ecuaciones de búsqueda en bases de datos y estableciendo criterios de elegibilidad para clasificar los archivos encontrados. Lo anterior, con la finalidad de encontrar la información referente a los bioplásticos basados en almidón, como sustituto de los plásticos provenientes del petróleo en la industria de empaques. Posteriormente, se elaboró un análisis de los datos obtenidos encontrando las características generales de las publicaciones, se determinaron las diferentes materias primas empleadas en la elaboración de

los bioplásticos como las fuentes de almidón, plastificantes, agentes reticulantes, rellenos y otros biopolímeros; se elaboró una síntesis de las aplicaciones en la producción de empaques, incluyendo los envases, y un análisis de la dirección de futuras investigaciones.

1. Marco Teórico

1.1 Plásticos tradicionales

Los plásticos provienen de materias primas como el petróleo, gas natural y carbón. Su producción se lleva a cabo a partir de la polimerización, una reacción química entre dos o más monómeros consecutivos que dan lugar a un polímero, que pueden ser transformados por diversos procesos como inyección, extrusión, termoformado, entre otros (Acoplasticos, 2022) con el fin de otorgarles la forma y características requeridas. La disposición y tratamiento indebido de este material ha dado lugar a la contaminación plástica, por tal motivo, se han propuesto diferentes estrategias para mitigar su impacto. Una de ellas es proporcionar a los plásticos la capacidad de biodegradarse, es decir, que través de un proceso bioquímico descomponga el polímero en agua, CO₂ y biomasa dependiendo de las condiciones ambientales a las cuales se expone (European Bioplastics, 2022). Algunos plásticos provenientes del petróleo, que poseen la capacidad de biodegradarse son el alcohol Polivinílico (PVA), succinato de polibutileno (PBS), tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT), entre otros. Sin embargo, teniendo en cuenta que los plásticos son de origen fósil y con el tiempo se fragmentan en polímeros más pequeños que contaminan el lugar donde son depositados, su uso a largo plazo no garantiza condiciones favorables para el medio ambiente ni se recomienda su producción masiva (Taofeeq D. Moshood, 2022).

1.2 Bioplásticos

Dentro de las opciones propuestas que permiten reemplazar a los plásticos de origen fósil son los bioplásticos. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) describe los bioplásticos como un “Polímero biobasado derivado de la biomasa u originado a partir de monómeros derivados de la biomasa”, en donde biobasado se refiere a “Compuesto derivado total o parcialmente de productos biológicos provenientes de la biomasa (incluidos los materiales vegetales, animales y marinos o forestales)” (IUPAC, 2012).

Según el proceso aplicado a la biomasa para su transformación en bioplástico, los bioplásticos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- a) **no biodegradables:** El primer paso para producir estos bioplásticos es la obtención de glucosa a partir de fuentes como la caña de azúcar, remolacha, maíz, trigo u otros materiales lignocelulósicos. Se continúa con la fermentación anaeróbica para obtener bioetanol, el cual, es destilado para la eliminación de agua. Posteriormente, se polimeriza el monómero del etileno para producir bioplásticos como bio polietileno(bio-PE), bio polipropileno (bio-PP), o bio tereftalato de polietileno (bio-PET) que presentan propiedades químicas, físicas y mecánicas semejantes a sus homónimos de origen fósil (Siracusa & Blanco, 2020). La ventaja del bio-PE al comportarse como un polímero tradicional, es que se cuenta con una infraestructura completa para su procesamiento y reciclaje, sin embargo, no es biodegradable (Nakajima, Dijkstra, & Loos, 2017).
- b) **Biobasado biodegradables:** Este grupo incluye polímeros extraídos directamente de la biomasa como polisacáridos (almidón, celulosa, quitina,etc), proteínas (colágeno, gelatina, caseína, suero de leche, proteína de soya, gluten de trigo, etc), polímeros producidos por síntesis química utilizando monómeros renovables biobasados como el Ácido poliláctico

(PLA), polímeros producidos por microorganismos o bacterias genéticamente modificadas denominados polihidroxicanoatos (PHA) y celulosa bacteriana (Pablo R. Salgado, 2021).

1.3 Bioplásticos basados en almidón

El almidón es la forma principal de carbohidratos en las plantas vasculares y se almacena en forma de gránulos con un diámetro en un rango de $<1\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$. Está compuesto de dos macromoléculas principales: amilosa, que es una cadena lineal α -D-(1,4)-glucana, y amilopectina, cadenas ramificadas en α -(1,6) cada 25-30 monómeros (Jayarathna, Andersson, & Andersson, 2022). Actualmente, el método más común de la producción de bioplástico es mediante el calentamiento de gránulos de almidón (Almidón termoplástico) en una fórmula con presencia de humedad, plastificantes y cargas, agentes reticulantes o una combinación de otros biopolímeros (Rahardiyana, Moko, Tan, & Lee, 2023). Los plastificantes juegan un papel importante en la elaboración de los bioplásticos basados en almidón. Son fundamentalmente disolventes no volátiles, que se comportan como lubricantes internos y permiten que las cadenas de polímeros se deslicen entre sí, aumentando el volumen libre del polímero (Raimond B. Seymour, 2021). Por otro lado, se pueden agregar reactivos reticulantes para mejorar algunas propiedades a los polímeros. Estos reactivos son moléculas que contienen dos o más extremos que se activan para lograr la unión con algunos grupos funcionales, mediante un enlace covalente para formar una red (Pochteca Colombia, 2022).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar una revisión sistemática del estado del arte sobre los bioplásticos basados en almidón como material alternativo para la elaboración de empaques.

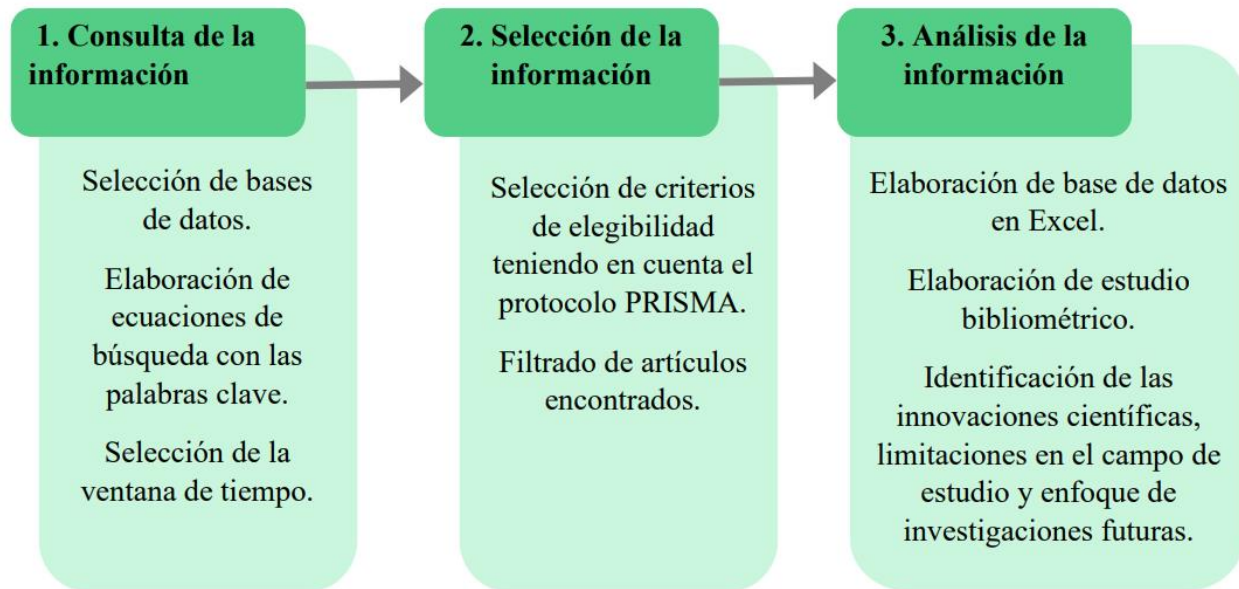
2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas relacionadas con la elaboración de bioplásticos basados en almidón como material para empaques.
- Identificar las innovaciones científicas en la producción de bioplásticos basados en almidón.
- Determinar las limitaciones en el campo de estudio y el enfoque que deben tomar las investigaciones futuras.

3. Descripción metodológica

Figura 1

Esquema de la metodología desarrollada



3.1 Consulta de la información

Las fuentes de información utilizadas en esta investigación fueron las bases de datos Web of Science (WOS) y Scopus en la ventana de tiempo comprendida entre los años 2013 y 2023.

Las ecuaciones de búsqueda se elaboraron con las palabras clave “bioplastic”, “food packaging”, “packaging” y “starch” con la finalidad de identificar aquellas investigaciones que aplicaran, fabricaran o incluyeran los bioplásticos basados en almidón en la industria de empaques. El idioma inglés fue escogido para la realización de la búsqueda.

3.2 Selección de la información

La selección de artículos se realizó con los siguientes criterios de elegibilidad, basados en la metodología PRISMA (Page, y otros, 2021).

1. **Identificación de duplicados.** Se eliminaron las referencias duplicadas, ya que es un aspecto común al momento de utilizar más de una base de datos para a revisión. Para este proceso, se cargaron las referencias de los artículos escogidos al gestor bibliográfico Mendeley y se llevó a cabo la eliminación de duplicados.
2. **Tipo de documento.** Se descartaron documentos correspondientes a publicaciones de conferencias, capítulos de libros y críticas, para obtener sólo artículos de revistas especializadas cuya veracidad ha sido respaldada científicamente.
3. **Título.** Se descartaron los títulos no relacionados con los bioplásticos basados en almidón.
4. **Resumen.** Se realizó la lectura del resumen de cada artículo para seleccionar a aquellos que incluyeran información sobre las innovaciones científicas relacionadas con los bioplásticos basados en almidón.
5. **Contenido.** Se evaluó el contenido de los artículos seleccionados en la etapa anterior, teniendo en cuenta parámetros como la metodología de fabricación y caracterización del material elaborado.

La organización y clasificación de la información según los criterios establecidos se elaboró con el apoyo de la herramienta Rayyan.

3.3 Análisis de la Información

Con base a los artículos seleccionados, se identificaron las innovaciones científicas en la producción de bioplásticos basados en almidón, determinando así las limitaciones presentes en la actualidad y el enfoque que deben tomar las investigaciones futuras. Para ello, se realizó un estudio bibliométrico alrededor de los temas a abordar, presentando las características de la extracción de

datos, y a partir de la lectura del estado del arte, se elaboró una base de datos en Excel con el fin de sintetizar y analizar la información obtenida.

4. Análisis de resultados

4.1 Resultados de la consulta y selección de artículos.

Para abarcar los artículos de forma integral, fueron incluidos operadores booleanos en las ecuaciones de búsqueda. El operador OR para tener en cuenta la palabra “bioplastic” en singular y plural, mientras que AND restringe la búsqueda a empaques elaborados con bioplásticos basados en almidón con las palabras “starch”, “packaging” y “food packaging”, obteniendo así un total de 547 artículos como se evidencia en la **tabla 1**.

Tabla 1

Número de resultados arrojados por la ecuación de búsqueda.

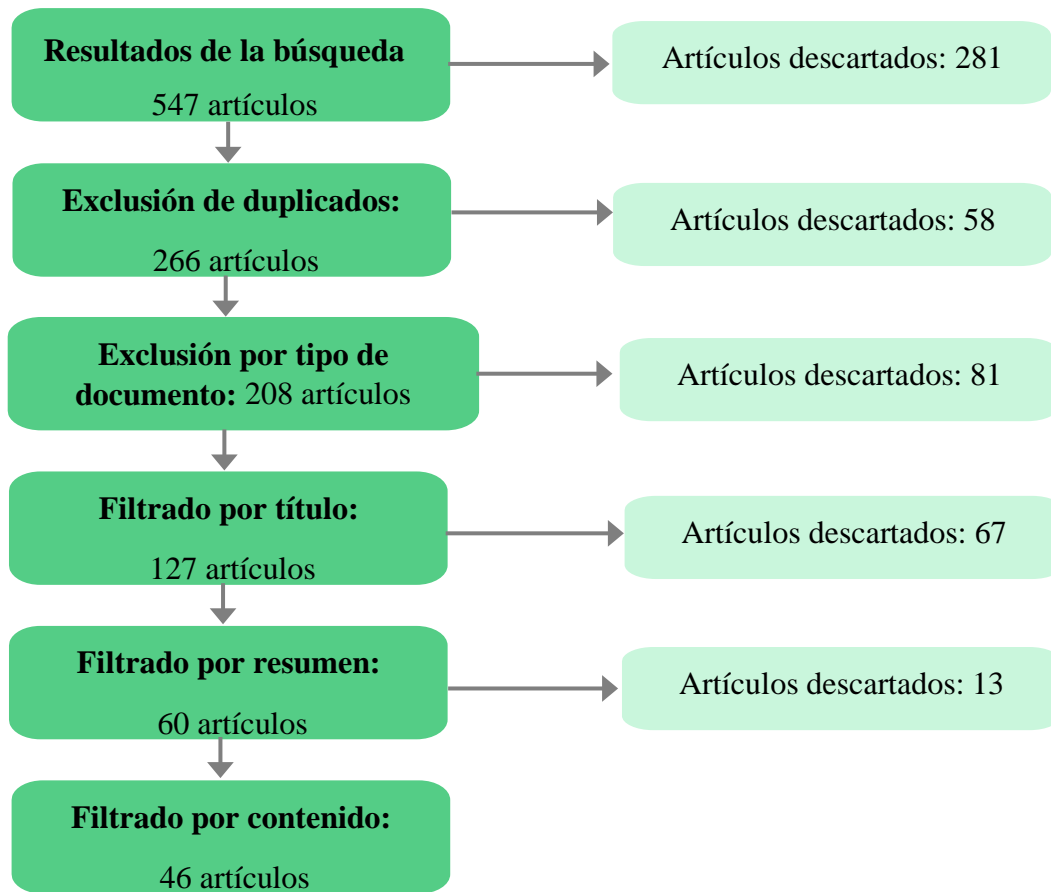
Fecha de búsqueda: 04/08/2023	Número de resultados		
Ecuación de búsqueda (2013-2023)	SCOPUS	WOS	Total
(“bioplastic”OR”bioplastics”)AND food packaging AND starch	93	83	176
(“bioplastic”OR”bioplastics”)AND packaging AND starch	197	174	371
Total	290	257	547

Con el total de artículos seleccionados, se identificaron las referencias duplicadas con el software Mendeley y se obtuvo un total de 266 documentos, de los cuales fueron excluidos 58 de ellos al no corresponder al tipo de documento necesitado. Posteriormente, con el apoyo de la

herramienta Rayyan se realizó la lectura de los títulos, resumen y contenido de los artículos restantes, seleccionando así 46 para la investigación como se muestra en la **figura 2**.

Figura 2

Proceso de selección de artículos según los criterios de elegibilidad establecidos.



Cabe resaltar que los 46 artículos seleccionados, 7 de ellos no fue posible su descarga y lectura, por tal motivo sólo se tuvieron en cuenta 39 de ellos en el análisis de datos.

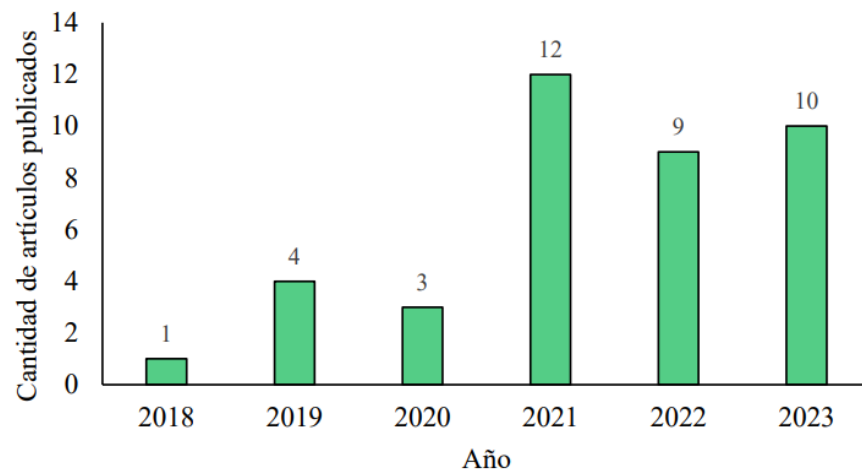
4.2 Estudio bibliométrico

En la **figura 3**, con base a los resultados obtenidos se puede evidenciar la evolución de las investigaciones realizadas sobre bioplásticos basados en almidón en los últimos años. En la

ventana del 2018 al 2020 se registró una cantidad reducida de artículos publicados, sin embargo, esta situación cambió en el año 2021 al tener el mayor número con un total de 12 artículos, lo que demuestra que, en los últimos 4 años ha crecido el interés por la investigación alrededor de los bioplásticos basados en almidón. Como dato, en los años anteriores al 2018 los artículos no cumplieron con algunos criterios de elegibilidad.

Figura 3

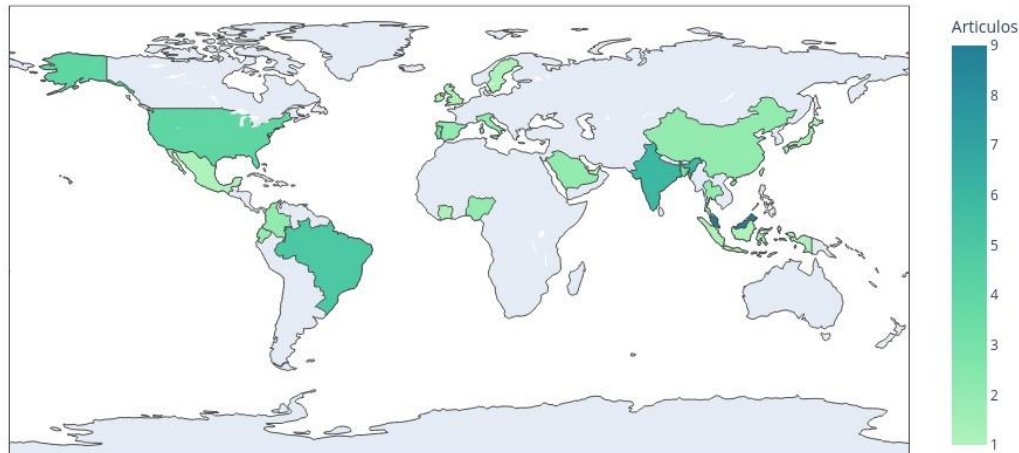
Cantidad de artículos publicados por año.



Como se observa en la **figura 4**, se evidencia un mayor interés de investigación en el continente de Asia, Oceanía y América.

Figura 4

Número de artículos publicados por país.



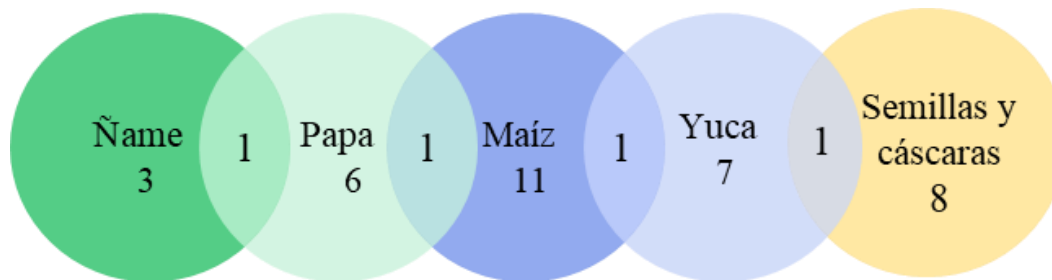
Esta situación puede tener relación con los altos niveles de contaminación plástica en estas zonas, siendo Malasia uno de los principales destinos de tráfico ilegal de residuos en 2020 (Picheta, 2020), y que posee la necesidad de encontrar alternativas viables a los plásticos convencionales. Es por ello que Malasia es el país que cuenta con mayor cantidad de artículos publicados con un total de 9, seguido de India con 6 y Brasil con 5. No obstante, otros 17 países también poseen publicaciones en la ventana de tiempo estudiada, aunque sólo presentaron uno o dos artículos por país.

El almidón de maíz representa más del 85% del mercado global de almidón, siendo así la planta de maíz una fuente importante de materia prima (Abotbina, Sapuan, Sultan, Alkbir, & Ilyas, 2021) y la más estudiada en la elaboración de bioplástico con un total de 13 artículos publicados. Otras fuentes como los tubérculos como la yuca, la papa, entre otros, son comúnmente empleados para residentes de regiones tropicales puesto que, en estas zonas, son esenciales en su nutrición al contener más del 80% de almidón en masa seca (Marichelvam, Jawaid, & Asim, 2019). Por lo anterior, se observó una abundante cantidad de artículos

publicados que utilizan almidón proveniente de maíz y tubérculos para la fabricación de bioplástico, como se muestra en la **figura 5**.

Figura 5

Diagrama de número de artículos publicados de diferentes fuentes de almidón



En el caso de las cáscaras y semillas de frutas como el cacao, aguacate, naranja, limón, entre otras, a pesar de no ser una fuente de almidón competitiva en el mercado, han tomado relevancia al representar un residuo en la industria de alimentos. A partir de semillas y cáscaras de aguacate es posible la elaboración de bioplásticos como solución a la generación de más de 1,2 toneladas de estos residuos por el procesamiento de aceite, guacamole, entre otros productos alimenticios (Merino, Bertolacci, Paul, Simonutti, & Athanassiou, 2021).

4.3 Composición de bioplásticos basados en almidón

Los bioplásticos pueden ser polímeros termoplásticos o termoestables. Los termoplásticos se caracterizan por ser blandos y dúctiles; los polímeros lineales y los que tienen estructuras ramificadas con cadenas flexibles entran en esta categoría. Mientras que, los termoestables son más duros, resistentes y frágiles que los termoplásticos; la mayoría de los polímeros entrecruzados y reticulados son termoestables (Callister, 1996).

El almidón termoplástico (TPS) se obtiene a partir de la gelatinización del almidón, un proceso en el cual en presencia de calor, agua y plastificante se transforma el almidón en bioplástico. La acción del agua y el plastificante es importante, porque debilitan los enlaces intermoleculares del almidón y disminuyen su temperatura de transición vítrea, facilitando la movilidad de las cadenas poliméricas (Lau, Kiew, Tan, Lam, & Yeoh, 2023) y como resultado se obtiene un bioplástico flexible apto para diversas aplicaciones.

Por otro lado, el almidón puede ser convertido a un polímero termoestable al añadirle reactivos reticulantes como el ácido cítrico, ácido acético, ácido clorhídrico, entre otros. La reacción de reticulación, convierte al sólido en una macromolécula que puede deformarse moderadamente si se calienta, pero que no presenta fluencia, por lo que una vez curado no podrá ser nuevamente moldeado (Salán, 2009). Es decir, este tipo de polímeros tiene la característica de que puede ser moldeado una sola vez y se endurece durante su formación, por lo que pueden soportar altas temperaturas. El ácido cítrico como agente reticulante, mejora la resistencia a la humedad de las películas poliméricas (Weng, Brazinha, Coelho, & Alves, 2021).

Tanto a los bioplásticos termoplásticos como termoestables, es posible adicionarles otros materiales a las formulaciones que permitan mejorar sus propiedades mecánicas,

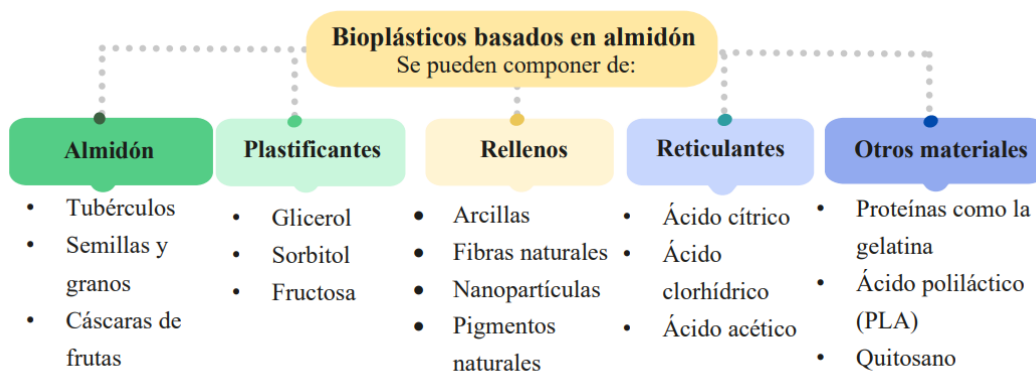
biodegradabilidad, o añadir características específicas dependiendo de su aplicación final. Estos materiales extras se denominan “rellenos” como pueden ser arcillas, fibras naturales, pigmentos o nanopartículas. Incluso, es posible elaborar mezclas entre el TPS con biopolímeros como el PLA o quitosano.

En la **figura 6** se elaboró un resumen general de las materias primas que pueden ser utilizadas en la composición de los bioplásticos como son los tipos de almidón, plastificantes, reticulantes, rellenos u otros biopolímeros. Cabe resaltar que no es necesario agregar elementos

de todas estas categorías para la elaboración de los bioplásticos basados en almidón, debido a que la formulación es estipulada por los investigadores según las propiedades que necesita en su producto final.

Figura 6

Esquema de la composición general de los bioplásticos basados en almidón.

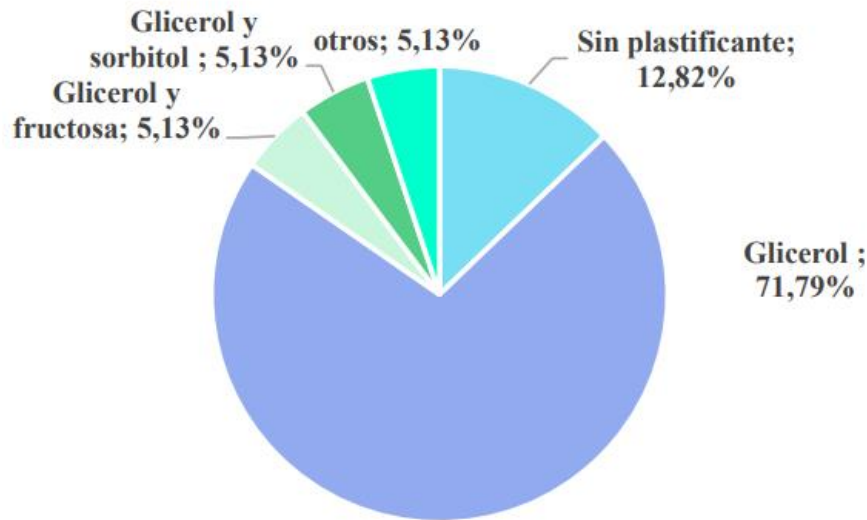


4.3.1 Plastificantes

El plastificante más empleado en la elaboración de bioplástico es el glicerol con un 71,79% de publicaciones. Aquellos artículos que mezclan dos plastificantes como el glicerol con fructosa o sorbitol representan un 10,26% como se muestra en la **figura 7**.

Figura 7

Plastificantes utilizados en las investigaciones seleccionadas de bioplásticos basados en almidón.



Existen varios trabajos basados en el estudio del efecto de los plastificantes en las propiedades mecánicas del polímero elaborado con algunas fuentes de almidón. Realizando una comparación entre el glicerol y sorbitol en el almidón de papa, investigadores afirman que las películas elaboradas con sorbitol mostraron una mayor resistencia a la tensión que el glicerol con la misma concentración de plastificante (Lau, Kiew, Tan, Lam, & Yeoh, 2023); además, presentan un mayor porcentaje de elongación con concentraciones entre 10% y 30% en peso, destacando que el almidón debe estar completamente gelatinizado para mejores resultados (Patel, y otros, 2023) (Lau, Kiew, Tan, Lam, & Yeoh, 2023). Por otro lado, se ha estudiado el comportamiento de la fructosa y el glicerol en el almidón de maíz. Estudios reportan una mayor resistencia a la tensión y elongación al utilizar concentraciones de fructosa al 30% en peso; por otro lado, recomiendan que, para obtener propiedades intermedias en los bioplásticos con

almidón de maíz, la combinación de ambos plastificantes es ideal, además de que se puede complementar al agregar rellenos como fibras (Abotbina, Sapuan, Sultan, Alkbir, & Ilyas, 2021) (Abotbina, Sapuan, Ilyas, & Sultan M. T. H. and Alkbir, 2022).

Otros plastificantes utilizados en las formulaciones fueron el poliglicerina-3 y policaprolactona (PCL). El primero está compuesto de 15–30% diglicerol, 35–48% triglicerol, 10–25% tetraglicerol en peso y el 10% restante de otros componentes como el glicerol; este plastificante en combinación con el almidón de cáscaras y semillas de aguacate resultó en una mezcla homogénea y compacta demostrando buena compatibilidad (Merino, Bertolacci, Paul, imonutti, & Athanassiou, 2021). Para el caso del PCL con almidón de maíz, investigadores no reportan resultados positivos debido a que la resistencia a la tensión mostró un comportamiento irregular (Diaz, Shah, Evans, Trabold, & Draper, 2020).

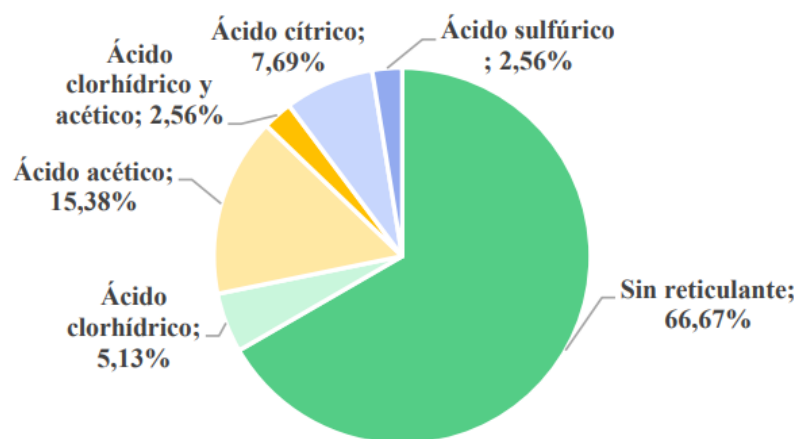
4.3.2 Agentes reticulantes

Solo el 33,3% de los artículos analizados en esta revisión sistemática utilizan agentes reticulantes para modificar químicamente la estructura del almidón. Este hecho indica que en la industria de empaques es más común la producción de bioplásticos termoplásticos que termoestables, puesto que los primeros no utilizan estos reactivos en su formulación. En ese sentido, sólo se registró un estudio entre la bibliografía estudiada que llevó a cabo una comparación entre dos agentes reticulantes, representado en un 2,56% (ver **figura 8**). Bello et al. (2023) elaboraron bioplástico con almidón de ñame, ácido cítrico o ácido acético, determinando que aquellos elaborados con HCl presentaron mejores propiedades mecánicas y térmicas en comparación con los producidos con ácido acético. Lo anterior muestra que el

agente reticulante utilizado influye en las especificaciones finales del material, y debe ser escogido dependiendo de las necesidades de cada autor y puede ser complementado con otros componentes. Meité et al. (2022) elaboraron bioplástico con almidón de yuca, ácido clorhídrico y metacaolín como relleno, con buena dispersión de la mezcla y propiedades mecánicas.

Figura 8

Agentes reticulantes utilizados en las investigaciones seleccionadas de bioplásticos basados en almidón.



El reticulante más utilizado fue el ácido acético con fuentes de almidón variadas con un 15,38%, este hecho puede estar relacionado a su costo y seguridad en la manipulación. Entre las investigaciones estudiadas fue mezclado con las siguientes fuentes de almidón: semillas y cáscaras de aguacate (Merino, Bertolacci, Paul, Simonutti, & Athanassiou, 2021) (Ahmed & Janaswamy, 2023), almidón de maíz (Amin, Chowdhury, & Kowser, 2019) (Yang, y otros, 2022), semillas de tamarindo y bayas (Chowdhury, Hossain, & Badrudduza M. D. and Rana, 2023), y en la fabricación de un material compuesto con almidón de papa, quitosano y óxido de grafeno (Alves, Ferreira, Ferreira, & Nunes, 2022). En el caso del ácido cítrico, fue utilizado en

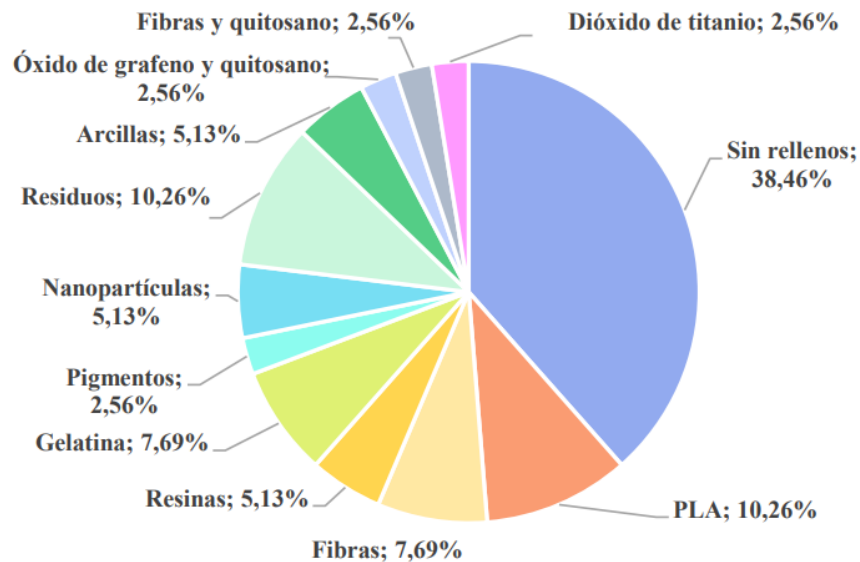
mezclas con almidón de maíz mostrando buenas propiedades antioxidantes y valores de permeabilidad al vapor de agua, la cual, describe la capacidad que tiene un material para ser penetrado por vapor de agua, datos importantes al elaborar empaques (Weng, Brazinha, Coelho, & Alves, 2021). Además, el ácido cítrico en mezclas con almidón de maíz y arroz permite elaborar muestras homogéneas con alta biodegradabilidad en tierra (Marichelvam, Jawaid, & Asim, 2019).

4.3.3 Rellenos y otros bioplásticos

Un 62% de los estudios analizados utilizaron rellenos u otros bioplásticos en compañía de almidón para crear un material compuesto con características específicas según su requerimiento en la industria. Este hecho demuestra que existe un gran interés por parte de los investigadores en encontrar materiales alternativos eficaces, para la elaboración de empaques al elevar las propiedades y características de los bioplásticos basados en almidón.

Figura 9

Porcentaje de los rellenos y otros bioplásticos utilizados en los estudios como complemento al almidón



Los más utilizados son el PLA (**figura 9**) y residuos industriales como el biocarbón proveniente del café (Diaz, Shah, Evans, Trabold, & Draper, 2020), cenizas de caña de azúcar (de Azevedo, y otros, 2020), compuestos fenólicos de la cáscara de papa (Lopes, y otros, 2021), pectinas de la cáscara de limón (Merino, Bertolacci, Paul, Simonutti, & Athanassiou, 2021), jengibre y té verde (Kowser, y otros, 2023). Además, se pueden utilizar nanopartículas como nanocelulosa que mejora la ductilidad de las películas y nanobentonita que contribuye a reforzar el sistema de resistencia mecánica (Lai, y otros, 2023).

4.4 Métodos de producción de los bioplásticos basados en almidón

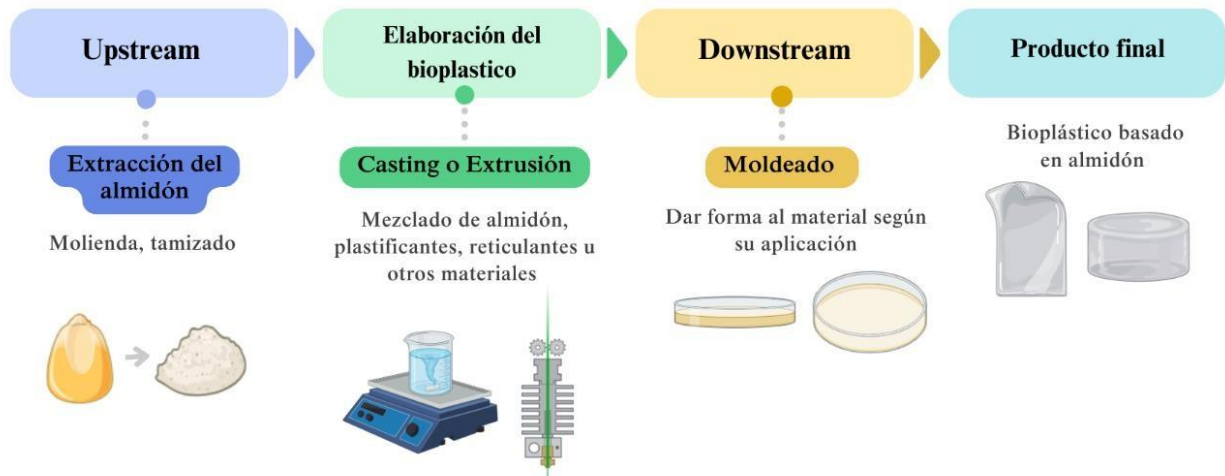
Los procesos previos a la elaboración del bioplástico permiten adecuar la materia prima para obtener un producto de mejor calidad. El más utilizado es la molienda que aplica disrupción mecánica para la extracción de los materiales poliméricos que se encuentran en las cáscaras de frutas como la naranja (Yaradoddi, y otros, 2022). Una de las frutas más estudiadas es el

aguacate: autores utilizan la cáscara y semilla de esta fruta para la elaboración de bioplástico. Para ello, las semillas se someten a un proceso de secado en horno previo a la molienda, aplicando condiciones de temperatura de 40 °C por 48 h (Merino, Bertolacci, Paul, Simonutti, & Athanassiou, 2021). En el caso de las cáscaras, la etapa de secado se lleva a cabo en condiciones de 50 °C por 24 h seguido de la molienda, una reacción de hidrólisis ácida para remover la lignina de la cáscara, una reacción de neutralización y, por último, una etapa de secado final (Ahmed & Janaswamy, 2023).

Este tipo de procedimientos aportan mejores propiedades mecánicas y químicas a los bioplásticos, dándoles características específicas al material, según el tipo de empaque para el cual será elaborado. El tamaño de partícula resultante de la etapa de molienda, juega un papel fundamental a la hora de mezclar el almidón con los plastificantes y reticulantes; por tal motivo, al escalar el proceso se requieren molinos industriales que permiten obtener partículas finas. El método de fundición o “casting” es la forma más común para producir bioplásticos basados en almidón. En primera instancia, se prepara la fórmula del bioplástico manualmente al mezclar almidón con agua destilada, plastificante y aditivos. Dependiendo de la cantidad de material que se requiera, se emplea un agitador magnético con calefacción, extrusoras simples o de doble tornillo. Posteriormente, la solución se deposita en el equipo escogido estableciendo las variables diferencial de temperatura y velocidad de agitación, dando lugar al almidón termoplástico o termoestable dependiendo el caso, y se continúa con la etapa de moldeado del material que brinda una forma específica como se muestra en la **figura 10**.

Figura 10

Esquema de producción de los bioplásticos basados en almidón



Los materiales compuestos de PLA y almidón, por lo general, utilizan el proceso de extrusión en una etapa para su elaboración a temperaturas entre 95-170 °C aproximadamente (Yusoff, Pal, Narayanan, & de Souza, 2021) (Yoksan, Boontanimitr, Klompong, & Phothongsurakun, 2022). Sin embargo, en algunos casos se deben emplear etapas extras para añadir aditivos como las resinas de pino (Aldas, Pavon, Lopez-Martinez, & Patricia Arrieta, 2020) (Pavon, Aldas, Lopez-Martinez, Hernandez-Fernandez, & Arrieta, 2021) con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas y térmicas del bioplástico al integrar homogéneamente el material extra. Es decir, en la primera extrusión se obtiene TPS, en la segunda se mezcla el TPS con las resinas y, por último, se lleva a moldeado por inyección para darle forma.

El 85% de los artículos encontrados utilizan el proceso de casting para la elaboración de bioplástico a escala laboratorio. Teniendo en cuenta los niveles de madurez tecnológica expuestos por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia, estaría catalogado en un TRL 3- Prueba experimental de concepto. Esta fase incluye la realización de actividades de investigación y desarrollo (I+D) dentro de las cuales, se incluye la realización de

pruebas analíticas y a escala en laboratorio orientadas a demostrar la factibilidad técnica de los conceptos tecnológicos (Minciencias). El 15% restante de los artículos que utilizan la extrusión y han realizado pruebas pertinentes con los materiales compuestos que han elaborado, se agrupan en el TRL 5 – Validación de sistema/subsistema/o componente en un ambiente relevante, en el cual los elementos básicos de determinada tecnología son integrados de manera que la configuración final es similar a su aplicación final; sin embargo, la operatividad del sistema y tecnologías ocurre todavía a nivel de laboratorio (Minciencias).

4.5 Biodegradabilidad de los bioplásticos

El almidón termoplástico es biodegradable al ser sus componentes de origen natural. Al momento de fabricar materiales compuestos con rellenos u otros bioplásticos, es necesario elaborar pruebas que muestren cómo afecta esta adición en la biodegradabilidad tanto en tierra como en agua. La **tabla 2** refleja los resultados obtenidos por los investigadores para diferentes formulaciones.

El 33,3% de los artículos estudiados realizaron pruebas de biodegradabilidad a sus muestras, de los cuales 6 de ellos aplicaron una prueba de biodegradabilidad en agua, por lo tanto, es notoria la limitada cantidad de artículos que evalúan este parámetro teniendo en cuenta los altos niveles de contaminación plástica que se encuentran actualmente en las fuentes hídricas.

Tabla 2
Biodegradabilidad de algunos bioplásticos basados en almidón

Bioplásticos	Biodegradabilidad		Referencia
	En tierra	En agua	
Mezclas de PLA y almidón	Comienza a degradarse a los 60 días, no especifican condiciones utilizadas.	No se degrada en agua de mar	(Papadopoulou, y otros, 2019);(Krishnamurthy & Amritkumar, 2019)
Compuestos con almidón de maíz	Se degrada hasta 66% en 35 días a una temperatura entre 25~30°C y humedad relativa de 75~80%	No estudios	(Fitch-Vargas, y otros, 2023) ; (Marichelvam, Jawaid, & Asim, 2019) ; (Amin, Chowdhury, & Kowser, 2019)
Polvo de cáscaras y semillas, plastificante, reticulante	En 30 días se degradan entre 60~80% con una humedad de 24%; no especifican la temperatura.	No estudios	(Ahmed & Janaswamy, 2023) ; (Chowdhury, Hossain, & Badrudduza M. D. and Rana, 2023)
Almidón de ñame, plastificante, arcillas o pigmentos	Para las arcillas a una temperatura de 32°C y humedad del 37% tardan entre 25~55 días en degradarse al 100%, en el caso del pigmento a 10 días se degradó un 20%.	Los compuestos con arcilla pueden tardar hasta 30 días en agua destilada a 37°C. No estudios para los pigmentos	(Behera, Mohanta, & Thirugnanam, 2022) ; (Poudel, Dutta, & Karak, 2023)
Almidón de yuca, plastificante, reticulante, fibras	Tarda 21 días en degradarse al 100% a condiciones ambientales con exposición solar, no específicos los datos.	Agua de mar a 18 días, no especifican condiciones.	(Armynah, Anugrahwidya, & Tahir, 2022)

Nota: *En los compuestos con almidón de maíz, algunos tienen refuerzos de fibras u minerales; sin embargo, presentan el mismo rango de biodegradabilidad en tierra.*

Con respecto a las mezclas de almidón y PLA, es resistente a la acción de los microorganismos debido a la estabilidad de este polímero. Su proceso de biodegradación comienza sólo con la hidrólisis que tiene lugar a 50°C, mientras que los grupos alquilo obstruyen la acción de las moléculas de agua, dando como resultado un proceso lento (Papadopoulou, y

otros, 2019). Por ende, si no es depositado y tratado correctamente actúa de forma semejante a un polímero tradicional y no representa una alternativa viable al ser un agente contaminante. En cuanto a los tipos de almidón, dependiendo de su naturaleza varía el tiempo que tarda en biodegradarse tanto en tierra como en agua.

4.6 Aplicaciones en la industria de empaques

Los bioplásticos basados en almidón pueden ser utilizados de diversas formas en la industria de empaques, como sustitutos de los polímeros tradicionales. Cabe destacar que el 44% de los artículos describieron la aplicación específica a la cual se pueden someter las muestras elaboradas, es decir, que más de la mitad afirma que sus muestras son aptas para empaques en general, sin detallar el destino de su producto.

Tabla 3

Aplicaciones de los bioplásticos como sustituto de los polímeros tradicionales.

Composición	Aplicación	Referencias
PLA, almidón	Contenedor de alimentos rígidos o pitillos, que no estén expuestos a temperaturas mayores a 160°, como alternativa al poliestireno o polipropileno.	(Papadopoulou, y otros, 2019); (Yusoff, Pal, Narayanan, & de Souza, 2021); (Krishnamurthy & Amritkumar, 2019)
Almidón, plastificante y reticulante	Sustituto del polietileno, para la fabricación de bolsas plásticas.	(Mroczkowska, Culliton, Germaine, & Neves, 2021); (Marichelvam, Jawaid, & Asim, 2019); (Ahmed & Janaswamy, 2023)
Almidón y gelatina	Espumas sustitutas del poliestireno expandido.	(Martin Torrejon, Song, Wu, Luo, & Song, 2023)

Almidón, plastificante, resinas	Contenedores de bebidas o alimentos calientes como vasos.	(Aldas, Pavon, Lopez-Martinez, & Patricia Arrieta, 2020) ; (Pavon, Aldas, Lopez-Martinez, HernandezFernandez, & Arrieta, 2021)
Almidón, aceite de palma y plastificante	Recubrimiento para papel que permite la retención de agua.	(Krishnamurthy & Amritkumar, 2019)

En la **tabla 3** se resumen las composiciones de los bioplásticos estudiados y sus aplicaciones. Con un número mayor de estudios se encuentran las mezclas de PLA y almidón, como contenedores rígidos de alimentos o pitillos; además, el almidón con reticulante se presenta como candidato para la sustitución del polietileno en la fabricación de bolsas plásticas. La adición de resinas se recomendó para contenedores de bebidas o alimentos calientes, la gelatina para la elaboración de espumas y el aceite de palma como recubrimientos de papel.

Tabla 4

Aplicaciones de los bioplásticos en empaques inteligentes.

Composición base	Adición	Aplicación inteligente	Referencia
Almidón de ñame, glicerol, ácido cítrico	Antocianina	Empaques de alimentos inteligentes con sensibilidad al pH	(Poudel, Dutta, & Karak, 2023)
Almidón de yuca, glicerol, ácido sulfúrico	Quitosano, fibra de hoja de piña, óxido de zinc	Empaques de alimentos con alta biodegradabilidad e inhibición de crecimiento bacteriano	(Armynah, Anugrahwidya, & Tahir, 2022)
Almidón de jugo de papa, glicerol		Películas cohesivas y flexibles que funcionan como una capa barrera de oxígeno como reemplazo del EtilenoVinil-Alcohol (EVOH)	(Poulose, Jonkkari, Hedenqvist, & Kuusipalo, 2021)

Almidón de papa, glicerol	Compuestos fenólicos de la cáscara de papa	Películas que permiten deshidratar pescado ahumado	(Lopes, y otros, 2021)
Almidón de maíz, glicerol, ácido acético	Dióxido de titanio	Empaques con propiedades antimicrobianas para la industria farmacéutica o de alimentos	(Amin, Chowdhury, & Kowser, 2019)
almidón de yuca y glicerol	Cáscara de limón	Empaques para pescado con propiedades antioxidantes	(Oluwasina & Awonyemi, 2021)
Almidón de papa, quitosano, ácido acético	Óxido de grafeno	Empaques de alimentos con bionanocompuestos con propiedades conductivas	(Alves, Ferreira, Ferreira, & Nunes, 2022)

Por otro lado, algunos artículos mostraron aplicaciones inteligentes relacionadas con el material adicionado. Los pigmentos como la antocianina brindan a los empaques de alimentos la capacidad de modificar su color dependiendo de los cambios en el pH, mientras que otros materiales pueden aportar características como la inhibición de crecimiento bacteriano, deshidratación de alimentos, propiedades antioxidantes y conductivas.

4.7 El futuro de los bioplásticos basados en almidón.

La contaminación plástica es una realidad que está afectando a nuestro país y al mundo. Esta situación promueve la investigación alrededor de los bioplásticos en la industria de empaques, al ser una de las industrias que más aporta a esta problemática. Los avances de los investigadores se basan en encontrar la formulación ideal para el material desde la fuente de almidón hasta los aditivos, variando concentraciones de las materias primas y condiciones de temperatura en el proceso. Es necesario profundizar en cómo cada reactivo influye en las propiedades mecánicas y químicas del bioplástico final, al igual que en el rango de biodegradabilidad tanto en tierra como en agua. De esta forma, se logra obtener un mejor panorama entorno a las ventajas y desventajas de la implementación de este material en la

industria, además de su impacto ambiental a largo plazo teniendo en cuenta la correcta disposición y tratamiento para cada tipo. Como dato, aumentar las investigaciones en torno a las aplicaciones en empaques inteligentes para alimentos brinda a este tipo de materiales una ventaja competitiva en comparación a los plásticos tradicionales. Por otro lado, se espera un aumento en los avances tecnológicos en la producción de bioplásticos basados en almidón con la finalidad de escalar los procesos a escala industrial y mejorar la metodología empleada para su elaboración.

5. Conclusiones

A partir de las investigaciones estudiadas se evidencia que, en los últimos años aumentó progresivamente el interés por la investigación en los bioplásticos basados en almidón, al incrementar el número de publicaciones; siendo los continentes de Asia y Oceanía, los que poseen un mayor número de artículos publicados por país. Según los datos encontrados, la materia prima más utilizada en la elaboración de este material, es el almidón proveniente de maíz y tubérculos, además del extraído de residuos como cáscaras y semillas de frutas.

Se han analizado diferentes materias primas en la composición de los bioplásticos como son los tipos de almidón, plastificantes, reticulantes, rellenos u otros biopolímeros. El plastificante más utilizado es el glicerol, mientras que, el reticulante más empleado fue el ácido acético. Teniendo en cuenta la aplicación final de los bioplásticos producidos, se adicionan rellenos u otros biopolímeros para otorgar las propiedades químicas o mecánicas requeridas. En los contenedores de alimentos, se emplea el ácido poliláctico (PLA) para otorgar rigidez, y resinas en aquellos que requieran mayor resistencia a la temperatura. Además, es posible

elaborar empaques inteligentes con sensibilidad al pH, inhibición de crecimiento bacteriano, entre otras características, representando una ventaja frente a los plásticos tradicionales.

Por otro lado, no se evidenció un número significativo de publicaciones, en las cuales, se aplicarán pruebas de biodegradabilidad tanto en tierra como en agua a los materiales compuestos elaborados, siendo esta una propiedad clave para identificar el impacto ambiental que tendría el uso de este en el futuro.

Referencias Bibliográficas

- Abotbina, W., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., & Sultan M. T. H. and Alkbir, M. F. (2022). Preparation and Characterization of Black Seed/Cassava Bagasse Fiber-Reinforced Cornstarch-Based Hybrid Composites. *Sustainability*, *14*. doi:10.3390/su141912042
- Abotbina, W., Sapuan, S. M., Sultan, M. T., Alkbir, M. F., & Ilyas, R. A. (2021). Development and Characterization of Cornstarch-Based Bioplastics Packaging Film Using a Combination of Different Plasticizers. *Polymers*, *13*. doi: 10.3390/polym13203487
- Acoplasticos. (2022). *¿Que son los plasticos?* Obtenido de Acoplasticos:
<https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/33-opc-fag-pre1>
- Ahmed, S., & Janaswamy, S. (2023). Strong and biodegradable films from avocado peel fiber. *Industrial Crops and Products*, *201*. doi:10.1016/j.indcrop.2023.116926
- Aldas, M., Pavon, C., Lopez-Martinez, J., & Patricia Arrieta, M. (2020). Pine Resin Derivatives as Sustainable Additives to Improve the Mechanical and Thermal Properties of Injected Moulded Thermoplastic Starch. *Applied Sciences-Basel*, *10*. doi:10.3390/app10072561
- Alves, Z., Ferreira, N. M., Ferreira, P., & Nunes, C. (2022). Design of heat sealable starchchitosan bioplastics reinforced with reduced graphene oxide for active food packaging. *Carbohydrate Polymers*, *291*. doi:10.1016/j.carbpol.2022.119517
- Amin, M. R., Chowdhury, M. A., & Kowser, M. A. (2019). Characterization and performance analysis of composite bioplastics synthesized using titanium dioxide nanoparticles with corn starch. *Heliyon*, *5*. doi:10.1016/j.heliyon.2019.e02009
- Armynah, B., Anugrahwidya, R., & Tahir, D. (2022). Composite cassava starch/chitosan/Pineapple Leaf Fiber (PALF)/Zinc Oxide (ZnO): Bioplastics with high

- mechanical properties and faster degradation in soil and seawater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 213, 814-823. doi:10.1016/j.ijbiomac.2022.06.038
- Behera, L., Mohanta, M., & Thirugnanam, A. (2022). Intensification of yam-starch based biodegradable bioplastic film with bentonite for food packaging application. *Environmental Technology & Innovation*, 25. doi:10.1016/j.eti.2021.102180
- Bello, T. K., Eze, E. C., Usman, M. S., & Isa, M. T. (2023). Characterization of bioplastics produced from yam and potato peels using hydrochloric and acetic acids. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 0. doi:10.1007/s13399-023-04021-2
- Callister, W. (1996). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales .II*. Reverté.
- Carlos Losada, Á. G. (2022). *Foros Semana. ¿Para dónde va la industria de los plásticos en Colombia? Expertos analizaron los retos y las oportunidades del sector*. Obtenido de Revista Semana: <https://www.semana.com/nacion/articulo/para-donde-va-la-industria-delos-plasticos-en-colombia-expertos-analizaron-los-retos-y-las-oportunidades-delsector/202200/>
- Chowdhury, M. A., Hossain, N., & Badrudduza M. D. and Rana, M. M. (2023). Development and characterization of natural sourced bioplastic for food packaging applications. *Heliyon*, 9. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e13538
- Coordinadora. (2023). *Empaque y embalaje: diferencias y tipos*. Obtenido de Coordinadora: <https://www.coordinadora.com/noticias-y-actualidad/empaque-y-embalaje-definicion-ydiferencias/>
- Cruz Roja. (2021). *¿Cuánto tardan en descomponerse los residuos más comunes?* Obtenido de [https://www2.cruzroja.es/web/ahora/-/cuanto-tardan-en-descomponerse-residuos-mascomunes#:~:text=Una%20simple%20bolsa%20de%20pl%C3%A1stico,torno%20a%](https://www2.cruzroja.es/web/ahora/-/cuanto-tardan-en-descomponerse-residuos-mascomunes#:~:text=Una%20simple%20bolsa%20de%20pl%C3%A1stico,torno%20a%20)

- 2010 s%20150%20a%C3%B1os de Azevedo, L. C., Rovani, S., Santos, J. J., Dias, D. B., Nascimento, S. S., Oliveira, F. F., . . .
- Fungaro, D. A. (2020). Biodegradable Films Derived from Corn and Potato Starch and Study of the Effect of Silicate Extracted from Sugarcane Waste Ash. *ACS Applied Polymer Materials*, 2, 2160-2169. doi:10.1021/acsapm.0c00124
- Diaz, C. A., Shah, R. K., Evans, T., Trabold, T. A., & Draper, K. (2020). Thermoformed Containers Based on Starch and Starch/Coffee Waste Biochar Composites. *Energies*, 13. doi:10.3390/en13226034
- European Bioplastics. (2022). *What are bioplastics? Material types, terminology, and labels – an introduction*. Obtenido de European Bioplastics: https://docs.europeanbioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf
- Farfan, M. R. (2019). *¿Por qué nos están plastificando la comida cada vez más?* Obtenido de Revista Semana: <https://www.semana.com/web/articulo/por-que-nos-estan-plastificandola-comida-cada-vez-mas/825/>
- Fedepapa. (2022). *Boletín Regional, Resumen Nacional*. Obtenido de <https://fedepapa.com/wpcontent/uploads/2023/07/Boleti%CC%81n-171.pdf>
- Fitch-Vargas, P. R., Camacho-Hernández, I. L., Rodríguez-González, F. J., Martínez-Bustos, F., Calderón-Castro, A., Zazueta-Morales, J. D., & Aguilar-Palazuelos, E. (2023). Effect of compounding and plastic processing methods on the development of bioplastics based on acetylated starch reinforced with sugarcane bagasse cellulose fibers. *Industrial Crops and Products*, 192. doi:10.1016/j.indcrop.2022.116084
- Fundacion AQUAE. (2021). *¿Cuál es el tiempo de degradación de los residuos inorgánicos?* Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/cuanto-tiempo-tardan->

- Lau, H. Y., Kiew, P. L., Tan, L. S., Lam, M. K., & Yeoh, W. M. (2023). Deciphering the effects of plasticizers in potato-based bioplastic for food and fresh produce packaging. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi:10.1007/s13762023-04936-3
- Lopes, J., Goncalves, I., Nunes, C., Teixeira, B., Mendes, R., Ferreira, P., & Coimbra, M. A. (2021). Potato peel phenolics as additives for developing active starch-based films with potential to pack smoked fish fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, 28. doi:10.1016/j.fpsl.2021.100644
- Marichelvam, M. K., Jawaid, M., & Asim, M. (2019). Corn and Rice Starch-Based Bio-Plastics as Alternative Packaging Materials. *Fibers*, 7. doi:10.3390/fib7040032
- Martin Torrejon, V., Song, H., Wu, B., Luo, G., & Song, J. (2023). Effect of Starch Type and Pre-Treatment on the Properties of Gelatin–Starch Foams Produced by Mechanical Foaming. *Polymers*, 15. doi:10.3390/polym15071775
- Md Hafizur Rahman, P. R. (2021). An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 294. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218
- Méité, N., Konan, L. K., Tognonvi, M. T., & Oyetola, S. (2022). Effect of metakaolin content on mechanical and water barrier properties of cassava starch films. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40, 186-194. doi:10.1016/j.sajce.2022.03.005
- Merino, D., Bertolacci, L., Paul, U. C., Simonutti, R., & Athanassiou, A. (2021). Avocado Peels and Seeds: Processing Strategies for the Development of Highly Antioxidant Bioplastic Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13, 38688-38699. doi:10.1021/acsami.1c09433

- MinAgricultura. (2021). *Estadísticas MinAgricultura*. Obtenido de <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx>
- Minciencias. (s.f.). *ANEXO 5. Technology Readiness Levels (TRL)*. Obtenido de Minciencias: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo5_7.pdf
- Mroczkowska, M., Culliton, D., Germaine, K., & Neves, A. (2021). Comparison of Mechanical and Physicochemical Characteristics of Potato Starch and Gelatine Blend Bioplastics Made with Gelatines from Different Sources. *Clean Technologies*, 3, 424-436. doi:10.3390/cleantechnol3020024
- Nakajima, H., Dijkstra, P., & Loos, K. (2017). The Recent Developments in Biobased Polymers toward General and Engineering Applications: Polymers that are Upgraded from Biodegradable Polymers, Analogous to Petroleum-Derived Polymers, and Newly Developed. *Polymers*, 9. doi:<https://doi.org/10.3390/polym9100523>
- Oluwasina, O. O., & Awonyemi, I. O. (2021). Citrus Peel Extract Starch-Based Bioplastic: Effect of Extract Concentration on Packed Fish and Bioplastic Properties. *Journal of Polymers and The Environment*, 29, 1706-1716. doi:10.1007/s10924-020-01990-7
- Pablo R. Salgado, L. D. (2021). Recent Developments in Smart Food Packaging Focused on Biobased and Biodegradable Polymers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. doi:<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.630393>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., . . . M, J. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. doi:<https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

- Papadopoulou, E. L., Paul, U. C., Tran, T. N., Suarato, G., Ceseracciu, L., Marras, S., . . . Athanassiou, A. (2019). Sustainable Active Food Packaging from Poly(lactic acid) and Cocoa Bean Shells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *11*. doi:10.1021/acsami.9b09755
- Patel, M., Islam, S., Kallem, P., Patel, R., Banat, F., & Patel, A. (2023). Potato starch-based bioplastics synthesized using glycerol-sorbitol blend as a plasticizer: characterization and performance analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *20*, 7843-7860. doi:10.1007/s13762-022-04492-2
- Pavon, C., Aldas, M., Lopez-Martinez, J., Hernandez-Fernandez, J., & Arrieta, M. P. (2021). Films Based on Thermoplastic Starch Blended with Pine Resin Derivatives for Food Packaging. *Foods*, *10*. doi:10.3390/foods10061171
- Picheta, R. (2020). *Malasia devolvió toneladas de desechos plásticos a países ricos: “No seremos el basurero del mundo”*. Obtenido de CNN:
<https://cnnespanol.cnn.com/2020/01/20/malasia-devolvio-toneladas-de-desechosplasticos-a-paises-ricos-no-seremos-el-basurero-del-mundo/>
- Plastics Europe. (2022). *Plastics-the facts 2022*. Obtenido de Plastics Europe:
https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/10/PE-PLASTICS-THE-ACTS_V7Tue_19-10-1.pdf
- Pochteca Colombia. (2022). *¿Qué son los reticulantes?* Obtenido de pochteca Colombia:
<https://colombia.pochteca.net/que-son-los-reactivosreticulantes/#:~:text=Son%20grupos%20reactivos%20cuyos%20extremos,pol%C3%ADmeros%20a%20partir%20de%20mon%C3%B3meros.>

- Poudel, R., Dutta, N., & Karak, N. (2023). A mechanically robust biodegradable bioplastic of citric acid modified plasticized yam starch with anthocyanin as a fish spoilage autodetecting smart film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242. doi:10.1016/j.ijbiomac.2023.125020
- Poulose, S., Jonkkari, I., Hedenqvist, M. S., & Kuusipalo, J. (2021). Bioplastic films with unusually good oxygen barrier properties based on potato fruit-juice. *RSC Advances*, 11, 12543-12548. doi:10.1039/d1ra01178b
- Rahardiyana, D., Moko, E. M., Tan, J. S., & Lee, C. K. (2023). Thermoplastic starch (TPS) bioplastic, the green solution for single-use petroleum plastic food packaging – A review. *Enzyme and Microbial Technology*, 168. doi:10.1016/j.enzmictec.2023.110260
- Raimond B. Seymour, C. E. (2021). *Introducción a la química de polímeros*. Reverte.
- Salán, M. (2009). *Tecnología de proceso y transformación de materiales*. UPC, S.L., Edicions.
- Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications. *Polymers*, 12. doi:https://doi.org/10.3390/polym12081641
- Taofeeq D. Moshood, G. N. (2022). Biodegradable plastic applications towards sustainability: A recent innovations in the green product. *Cleaner Engineering and Technology*, 6. doi:https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100404
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2018). *Una vida de plástico*. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México: <https://ciencia.unam.mx/leer/766/una-vidade-plastico>

- Weng, V., Brazinha, C., Coelho, I. M., & Alves, V. D. (2021). Decolorization of a Corn Fiber Arabinoxylan Extract and Formulation of Biodegradable Films for Food Packaging. *Membranes*, 11. doi:10.3390/membranes11050321
- Yang, J., Dong, X., Wang, J., Ching, Y. C., Liu, J., Li, C., . . . Xu, S. (2022). Synthesis and properties of bioplastics from corn starch and citric acid-epoxidized soybean oil oligomers. *Journal of Materials Research and Technology-JMR&T*, 20, 373-380. doi:10.1016/j.jmrt.2022.07.119
- Yaradoddi, J. S., Banapurmath, N. R., Ganachari, S. V., Soudagar, M. E., Sajjan Ashok M. and Kamat, S., Mujtaba, M. A., . . . Siddiqui, M. I. (2022). Bio-based material from fruit waste of orange peel for industrial applications. *Journal of Materials Research and Technology-JMR&T*, 17, 3186-3197. doi:10.1016/j.jmrt.2021.09.016
- Yoksan, R., Boontanimitr, A., Klompong, N., & Phothongsurakun, T. (2022). Poly(lactic acid)/thermoplastic cassava starch blends filled with duckweed biomass. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203, 369-378. doi:10.1016/j.ijbiomac.2022.01.159
- Yusoff, N. H., Pal, K., Narayanan, T., & de Souza, F. G. (2021). Recent trends on bioplastics synthesis and characterizations: Polylactic acid (PLA) incorporated with tapioca starch for packaging applications. *Journal of Molecular Structure* , 1232. doi: 10.1016/j.molstruc.2021.129954