

Paola

Valorización de residuos de papa para la obtención de bioplásticos degradables reforzados con óxido

 Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:408024079

Fecha de entrega

21 nov 2024, 3:06 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

21 nov 2024, 3:16 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

Valorización de residuos de papa para la obtención de bioplásticos degradables reforzados conpdf

Tamaño de archivo

411.6 KB

15 Páginas

7,420 Palabras

38,459 Caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.upct.es	0%
2	Internet	repositorio.unal.edu.co	0%
3	Trabajos entregados	Universidad Técnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE o...	0%
4	Internet	bibliotecadigital.exactas.uba.ar	0%
5	Internet	es.scribd.com	0%
6	Trabajos entregados	Universidad Técnica de Machala on 2022-09-02	0%
7	Trabajos entregados	Universidad Europea de Madrid on 2023-05-05	0%
8	Internet	cicy.repositorioinstitucional.mx	0%
9	Internet	tesis.ipn.mx	0%
10	Internet	repositorio.unc.edu.pe	0%
11	Internet	dspace.esPOCH.edu.ec	0%

12	Internet	dspace.umh.es	0%
13	Internet	preeica.ca	0%
14	Internet	www.alimentosargentinos.gov.ar	0%
15	Internet	es.wikipedia.org	0%
16	Internet	fdocumentos.tips	0%
17	Internet	www.scribd.com	0%
18	Publicación	Ramón Tejada Oliveros. "Optimización de las propiedades de tenacidad e impact...	0%
19	Internet	repository.kln.ac.lk	0%
20	Internet	www.mma.es	0%
21	Trabajos entregados	Escuela Politecnica Nacional on 2024-01-06	0%
22	Publicación	José Alonso Dena Aguilar, Arturo Díaz Ponce, Claudio Frausto Reyes, Francisco Vill...	0%
23	Trabajos entregados	Marine Academy of Technology and Environmental Science on 2020-05-13	0%
24	Internet	docplayer.es	0%
25	Internet	ouci.dntb.gov.ua	0%

26	Internet	repositoriodigital.uns.edu.ar	0%
27	Internet	www.researchgate.net	0%
28	Internet	www.virtualpro.co	0%
29	Trabajos entregados	Consortio CIXUG on 2024-10-04	0%
30	Trabajos entregados	Universidad San Francisco de Quito on 2024-09-25	0%
31	Internet	eprints.uanl.mx	0%
32	Internet	oceanoday.noaa.gov	0%
33	Internet	repositorio.autonoma.edu.co	0%
34	Internet	repositorio.uaaan.mx	0%
35	Internet	repositorio.uta.edu.ec	0%
36	Internet	ri.conicet.gov.ar	0%
37	Internet	rua.ua.es	0%
38	Internet	www.aapa.org.ar	0%
39	Internet	www.readfy.com	0%

40

Internet

www.repositorio.usac.edu.gt

0%

41

Internet

www.wearcheckiberica.es

0%

1 Artículo

2 Valorización de residuos de papa para la obtención de bioplás-
3 ticos degradables reforzados con óxido de grafeno4 Mary Luz Quispe¹, Paola Glenda Bruna¹.5 ¹ Professional School of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Universidad
6 Peruana Unión, Juliaca 21100, Peru; mary.quispe@upeu.edu.pe (M.L.Q.); paola.bruna@upeu.edu.pe (P.G.B.).
7

8 **Resumen:** La creciente demanda de bioplásticos plantea desafíos significativos en su producción, lo
9 que resalta la necesidad de alternativas respetuosas con el medio ambiente. Los bioplásticos han
10 ganado relevancia al ofrecer soluciones biodegradables y sostenibles. Este estudio presenta la valo-
11 rización de los residuos de papa como fuente para la producción de bioplásticos biodegradables
12 reforzados con óxido de grafeno. Se desarrollaron cuatro formulaciones con diferentes proporciones
13 de óxido de grafeno y almidón de cáscara de papa: T1 (0.045 g de óxido de grafeno y 8 g de almidón),
14 T2 (0.065 g de óxido de grafeno y 8 g de almidón), T3 (0.045 g de óxido de grafeno y 10 g de almidón)
15 y T4 (0.065 g de óxido de grafeno y 10 g de almidón). La resistencia a la tracción y elongación de los
16 bioplásticos se evaluaron utilizando una máquina universal de ensayos de tracción, mientras que
17 las estructuras moleculares e interacciones químicas se analizaron mediante Espectroscopia Infra-
18 roja por Transformada de Fourier (FTIR). El contenido de humedad y la solubilidad se determina-
19 ron siguiendo los métodos oficiales de la AOAC, y la biodegradabilidad se evaluó mediante el pro-
20 tocolo ASTM D5988. Entre los tratamientos, T3 mostró la mayor resistencia a la tracción (0.39 MPa),
21 mientras que T2 presentó la mayor flexibilidad (elongación del 10.29%). El análisis FTIR reveló la
22 presencia de grupos funcionales como O-H y C-H en la estructura del bioplástico. En cuanto a la
23 biodegradación, T4 alcanzó la mayor tasa de degradación, logrando un 90.17% en 30 días. Los re-
24 sultados sugieren que el almidón residual de cáscara de papa, combinado con óxido de grafeno,
25 mejora significativamente las propiedades mecánicas, la biodegradabilidad y la flexibilidad de los
26 bioplásticos.

27 **Palabras clave:** bioplásticos; almidón de cáscara de papa; óxido de grafeno; biodegradabilidad.
28Citation: To be added by editorial
staff during production.Academic Editor: Firstname Last-
name

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2024 by the author

Submitted for possible open access

publication under the terms and

conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY) license

(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

A nivel global, el aumento desmedido en la demanda de plástico ha provocado una gran acumulación de residuos plásticos en el suelo y cuerpos de agua. Se estima que se han producido aproximadamente 8300 millones de toneladas métricas de plástico, y se calcula que alrededor del 75% de esta total ha sido desechado en el medio ambiente, contribuyendo de manera significativa a la contaminación mundial. Una gran porción de estos residuos plásticos termina en los océanos, ríos y otros cuerpos de agua [2]. Un caso destacado es el Gran Parche de Basura del Pacífico, que comenzó a formarse a finales de los años 1980 y principios de los 1990, donde se concentra una enorme cantidad de desechos plásticos que ocasionan graves perjuicios a la vida marina [3].

El uso masivo de plásticos está originando dos problemas ambientales importantes: el elevado consumo de combustibles fósiles no renovables en su producción y la contaminación causada por plásticos no reciclables que impactan negativamente en el medio ambiente. En respuesta a estos desafíos, se han desarrollado materiales poliméricos biodegradables como una alternativa más sostenible [4]. El uso de bioplásticos es una alterna-

44 tiva sostenible frente a los plásticos convencionales, gracias a su origen en recursos reno-
45 vables y a su biodegradabilidad en el medio ambiente. Entre las fuentes más prometedoras
46 para producir bioplásticos se encuentra el almidón de papa, un material que sobresale
47 por su abundancia y bajo costo[5].

48 Se estima que entre el 15% y 40% del peso total de la papa se convierte en residuo en
49 forma de cáscaras durante su procesamiento. Estos residuos representan una cantidad
50 significativa en las industrias alimentarias que procesan grandes cantidades de papas,
51 como en la producción de snacks, puré instantáneo y alimentos procesados [6]. La pulpa
52 y las cáscaras de papa son fuentes abundantes de almidón y celulosa, lo que las convierte
53 en un material excelente para la fabricación de bioplásticos [7]. Sin embargo, su principal
54 desventaja es su baja resistencia mecánica y su alta susceptibilidad a la humedad, lo que
55 restringe su utilización en aplicaciones industriales de mayor demanda [8].

56 Las películas elaboradas a partir de almidón pueden sellarse térmicamente para formar
57 bolsas de empaque. No obstante, presentan ciertas limitaciones, como fragilidad, propiedades
58 mecánicas insuficientes e hidrofobicidad, las cuales requieren ser resueltas [9]. La
59 resistencia a la tracción de los bioplásticos derivados del almidón puede oscilar entre 3 y
60 50 MPa, dependiendo de la cantidad de plastificante y los refuerzos incorporados [10]. La
61 elongación a la ruptura también está influenciada por la cantidad de plastificante, siendo
62 los bioplásticos más flexibles cuando contienen un mayor porcentaje de estos aditivos. Sin
63 embargo, es relevante señalar que los bioplásticos tienden a ser más frágiles que los plásticos
64 petroquímicos, lo que restringe algunas de sus aplicaciones sin la incorporación de
65 refuerzos adecuados [11]. Estos problemas pueden ser mejorados mediante diversas modificaciones,
66 como la combinación de dos o más polímeros [12] o la incorporación de agentes
67 activos y reforzantes [13].

68 El óxido de grafeno actúa reforzando la matriz del bioplástico al proporcionar una
69 estructura sólida que mejora tanto la resistencia a la tracción como la estabilidad térmica
70 del bioplástico [14]. El grafeno incrementa la resistencia a la tracción y la estabilidad térmica
71 de las películas de bioplástico [10]. Este aditivo presenta propiedades mecánicas y
72 térmicas excepcionales que puede mejorar considerablemente la resistencia del bioplástico,
73 aumentando su competitividad frente a los plásticos derivados del petróleo[14]. Además
74 de mejorar las propiedades mecánicas, la incorporación de óxido de grafeno puede
75 tener un efecto positivo en la biodegradabilidad del material. Durante la descomposición
76 de los bioplásticos reforzados con grafeno, se ha observado que los fragmentos de grafeno
77 no tienen un impacto significativo en el medio ambiente, lo que los hace una opción adecuada
78 para aplicaciones sostenibles y ecológicas[11].

79 El óxido de grafeno es un material bidimensional formado por una sola capa de átomos
80 de carbono dispuestos en una estructura hexagonal. Se produce a partir del grafito
81 mediante un proceso de oxidación química, generalmente a través del método de Hummers.
82 Este proceso implica el uso de fuertes agentes oxidantes, como el permanganato de potasio
83 (KMnO_4) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4), que introducen grupos funcionales oxigenados,
84 como epóxidos, hidroxilos y carboxilos, en las láminas de grafeno. Estos grupos
85 funcionales incrementan significativamente la hidrofobicidad del material y facilitan su
86 dispersión en agua, lo que lo convierte en un material altamente versátil para aplicaciones
87 en nanocompuestos, biosensores y sistemas de liberación de medicamentos [10].

88 Las nanopartículas de celulosa se emplean para aumentar la rigidez y resistencia del
89 bioplástico, además de favorecer su biodegradabilidad. Asimismo, las nanopartículas de
90 óxido de zinc, magnesio y cobre refuerzan las propiedades mecánicas y térmicas del material,
91 y algunos de estos agentes también proporcionan propiedades antimicrobianas [15]. El glicerol
92 es un plastificante comúnmente utilizado para mejorar la flexibilidad de los bioplásticos.
93 Aunque no actúa como un refuerzo en el sentido estricto, favorece la manipulación y el
94 rendimiento del bioplástico en aplicaciones prácticas [16]. El procesamiento de bioplásticos
95 a partir de almidón de papa y óxido de grafeno ofrece beneficios tanto ambientales como
96 económicos. Desde el punto de vista ambiental, el uso de recursos renovables y la mejora de
97 las propiedades de biodegradabilidad y propiedades mecánicas

hacen que estos bioplásticos representen una alternativa sostenible frente a los plásticos convencionales [10].

Este estudio tiene como objetivo evaluar la valorización de los residuos de papa como una fuente para la producción de bioplásticos biodegradables reforzados con óxido de grafeno. La investigación busca explorar el potencial de este residuo, no solo como un recurso abundante y de bajo costo, sino también como un medio para mejorar las propiedades funcionales de los bioplásticos, promoviendo su viabilidad para aplicaciones industriales sostenibles. Los bioplásticos con mayores proporciones de almidón y óxido de grafeno demuestran una mayor resistencia a la tracción, flexibilidad y biodegradabilidad. Estos materiales exhiben propiedades mecánicas y un desempeño ambiental mejorados, destacando el papel fundamental de optimizar la proporción de almidón y óxido de grafeno. Estos avances en las formulaciones de bioplásticos los hacen más adecuados para una amplia variedad de aplicaciones industriales y ecológicas, ofreciendo una alternativa sostenible a los plásticos tradicionales. Los hallazgos subrayan el potencial para seguir innovando en el desarrollo de materiales ecológicos con propiedades personalizadas.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

En el presente estudio, para la fabricación de bioplásticos, se emplearon cáscaras de papa como fuente de almidón residual, las cuales fueron obtenidas a partir de desechos generados en restaurantes. Además, se utilizó óxido de grafeno en polvo (color negro, densidad de 0.35 g/cm³, pH entre 3.0-7.0, humedad entre 10-12 % y tamaño de partícula de ~1 µm), ácido acético al 30 % y glicerina, todos estos reactivos proporcionados por la marca J.T. BAKER.

2.2. Extracción de almidón residual de papa

El almidón de las cáscaras de papa se obtuvo mediante un proceso que comienza con el lavado, pelado y reducción del tamaño de partícula. Las cáscaras trituradas se mezclaron con agua destilada en una proporción de 1:10, se filtraron utilizando una tela de muselina y se dejaron decantar durante 24 horas. El precipitado resultante se lavó tres veces con agua destilada y se secó a 60 °C durante 24 horas para determinar el rendimiento del almidón (Figura 1) [17]



Figura 1. Diagrama del proceso de extracción de almidón.

2.3. Procesamiento del bioplástico

El procesamiento del bioplástico se llevó a cabo siguiendo la formulación detallada en la Tabla 1. Primero, se preparó una solución mezclando agua destilada, ácido acético al 30%, y óxido de grafeno. Esta mezcla se agitó a una velocidad constante de 600 revoluciones por minuto (rpm) durante 25 minutos para obtener una solución homogénea. Luego, se incorporó el almidón en polvo, manteniendo la agitación durante 5 minutos adicionales, y posteriormente se añadió la glicerina, continuando la agitación por otros 5 minutos. La mezcla resultante se calentó hasta alcanzar los 60 °C para su gelatinización.

La glicerina facilitó la formación de una película estable de bioplástico (Figura 2). Una vez obtenida, la película fue cuidadosamente transferida a un recipiente, el cual se colocó en un desecador durante 72 horas para la eliminación de humedad residual, logrando así una película consistente y con las propiedades requeridas para su análisis posterior.



Figura 2. Diagrama de la fabricación de bioplásticos a partir de almidón de cáscara de papa y óxido de grafeno.

Tabla 1. Formulación para la obtención del bioplástico.

Tratamiento	Óxido de grafeno (g)	Almidón (g)	Ácido acético 30% (g)	Glicerina (g)	Agua destilada (g)
T1	0.045	8	5	10	80
T2	0.065	8	5	10	80
T3	0.045	10	5	10	80
T4	0.065	10	5	10	80

2.4. Determinación del contenido de amilosa y amilopectina

Se utilizó la técnica de unión de yodo con doble longitud de onda para cuantificar los contenidos de amilosa y amilopectina en el almidón residual de cáscara de papa [18]. Se preparó una solución estándar de amilosa o amilopectina (1 mg/ml) a 80 °C, y se añadieron unas gotas de yodo a cada una. La mezcla resultante se analizó mediante espectrofotometría UV (UV1800, Shimadzu Instrument Co., Ltd., Jiangsu, China) en un rango de 400 a 800 nm. Los niveles de amilosa y amilopectina en las muestras se determinaron a las longitudes de onda seleccionadas de 499 nm y 540 nm, respectivamente, usando 586 nm y 725 nm como longitudes de onda de referencia.

2.5. Determinación de color del almidón

El color del almidón residual de cáscara de papa se evaluó utilizando un colorímetro (NH300 Portable Colorimeter, China), que mide la luz reflejada por la muestra en diversas longitudes de onda, permitiendo obtener los valores CIELab: L* (luminosidad), a* (eje verde-rojo), y b* (eje azul-amarillo). En este sistema, L* varía de 0 (negro) a 100 (blanco), a* oscila entre verde (-a) y rojo (+a), y b* entre azul (-b) y amarillo (+b). Estos valores ofrecen una representación precisa de las características de color del almidón, facilitando el control de calidad visual y la detección de cambios estructurales derivados de procesos como la gelatinización o tratamientos químicos.

2.6. Evaluación química del almidón

El contenido de humedad del almidón residual se evaluó mediante el método de secado en horno, de acuerdo con el método oficial AOAC 972.20. El contenido de proteínas se analizó mediante el método AOAC 968.06 y el contenido de cenizas se determinó utilizando el método AOAC 923.03 [20].

2.7. Propiedades mecánicas

El ensayo de resistencia a la tracción y elongación de bioplásticos se llevó a cabo siguiendo el método ASTM D882, utilizando una máquina de ensayo universal de tracción (Instron 3369, Estados Unidos)[21]. Se prepararon muestras de bioplástico con un espesor inferior a 1 mm, las cuales fueron estiradas a una velocidad constante de 1 mm/s. Durante el ensayo, se registraron los datos de la fuerza máxima en MPa y la elongación en porcentaje. Estos parámetros son fundamentales para evaluar la resistencia mecánica y la flexibilidad de las películas de bioplástico, lo que permite determinar su desempeño y viabilidad en aplicaciones específicas [22].

2.8. Análisis de Grupos Funcionales

Los espectros FT-IR de las muestras de almidón y bioplásticos fueron obtenidos mediante un espectrómetro infrarrojo FTIR-ATR (Perkin Elmer, Estados Unidos). Las muestras se mezclaron individualmente con bromuro de potasio y se comprimieron para su análisis. Los espectros se registraron con una resolución de 4 cm⁻¹, cubriendo un rango de longitud de onda de 380-1 a 4000 cm⁻¹ [18].

2.9. Análisis de humedad

El contenido de humedad de los bioplásticos se determinó por método de secado en horno, de acuerdo con el método oficial AOAC 972.20 [23]. El cálculo de la humedad se realizó mediante la siguiente ecuación (1):

$$\begin{aligned} \text{Contenido de humedad}(\%) &= \frac{W_0 - W_f}{W_0} \times 100 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde W_0 es el peso inicial del bioplástico (g), W_f es el peso del bioplástico después del secado (g).

2.10. Prueba de solubilidad

La solubilidad de los bioplásticos se adaptó de los estudios realizados [24]. Las películas de bioplástico se cortaron en un tamaño uniforme de 3 cm x 3 cm, y se registró su masa inicial. Luego, las películas se sumergieron en un recipiente con agua destilada durante 80 minutos. Durante este tiempo, se retiraron del agua a intervalos de 10 minutos. Después de cada extracción, las películas se secaron suavemente con papel tisú y se pesaron antes de volver a sumergirlas en el agua. La absorción de agua por parte de la película se calculó utilizando ecuación (2). Se reportaron los resultados promedio de tres mediciones.

$$\begin{aligned} \text{Solubilidad en agua}(\%) &= \frac{W_0 - W_2}{W_0} \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde W_0 es el peso seco inicial de la muestra (g), W_f es el peso seco final de la parte no disuelta (g).

2.11. Prueba de biodegradabilidad

La biodegradabilidad de los bioplásticos se evaluó mediante el cálculo de la diferencia entre la masa inicial y la masa final del material después de un período de exposición a condiciones de descomposición dentro del suelo. Durante este proceso, las muestras de bioplástico fueron enterradas en un entorno controlado, donde las condiciones de humedad, temperatura y la actividad microbiana favorecen la descomposición del material. Tras un período determinado de exposición (3, 12, 21 y 30 días), se extrajeron las muestras

y se pesaron para determinar la masa residual, lo que permitió calcular el porcentaje de biodegradabilidad, utilizando la ecuación (3) [24]. Cada muestra fue sometida a tres réplicas durante el proceso de biodegradación.

$$\text{Biodegradabilidad}(\%) = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

Donde W_0 es el peso inicial del bioplástico (g), W_f es el peso final del bioplástico (g).

2.12. Análisis de datos

Los datos de las características físicas, químicas y de biodegradabilidad fueron analizados mediante la prueba de rango múltiple de LSD de Fisher, con el fin de determinar las diferencias significativas entre los tratamientos. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software Statgraphics 19 (Statistical Graphics Corp., Herndon, Va., EE. UU.).

3. Resultados y discusiones

3.1. Caracterización fisicoquímica del almidón residual

El almidón residual de cáscara de papa presentó un contenido de humedad del 10.62%, con una alta proporción de amilopectina (77.36%) en comparación con amilosa (22.64%). Esto indica que la estructura del almidón es predominantemente ramificada, lo que lo hace favorable para aplicaciones de gelatinización a una temperatura de 69.5 °C y facilita las transiciones térmicas [25]. El almidón con mayor contenido de amilopectina mejora las propiedades mecánicas de los bioplásticos derivados del almidón de papa, además de promover la formación de redes de gel más estables y flexibles, esenciales para aplicaciones en la producción de biopolímeros [6].

Su bajo contenido de proteínas (1.44%) y cenizas (0.51%) indica una alta pureza del almidón, lo que lo hace adecuado para procesos que requieren una interferencia mínima de otros componentes, como los bioplásticos [8]. En cuanto a los parámetros de color, el almidón exhibe un alto nivel de brillo ($L^* = 93.04$), con coordenadas a^* (-0.87) y b^* (5.08) cercanas a neutro, reflejando un tono claro y ligeramente amarillento (Tabla 2). Esta característica podría ser ventajosa para aplicaciones industriales, como la producción de bioplásticos, donde las propiedades estéticas son importantes. [26,27].

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del almidón residual de cascara de papa.

Propiedades fisicoquímicas	Valor promedio
Amilosa (%)	22.64
Amilopectina (%)	77.36
Proteína total (%)	1.44
Ceniza (%)	0.51
Humedad (%)	10.62
L^* (luminosidad)	93.04
a^* (verde-rojo)	-0.87
b^* (azul-amarillo)	5.08

En los resultados para espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) del almidón residual de papa, se encontraron los picos característicos de enlace O-H, C-H, C-O-C, C-O, que están presentes en la estructura del almidón. La banda ubicada entre 1685 cm⁻¹ y 1600 cm⁻¹ representa la flexión del grupo OH del agua, lo que indica

que el polímero es higroscópico (Figure 3). Asimismo, resulta significativo para la estabilidad y el desempeño del almidón en aplicaciones en las que la retención de humedad puede modificar su textura, durabilidad y otras propiedades físicas. Además, esta capacidad de absorber agua tiene un impacto importante en el procesamiento y almacenamiento del almidón, dado que puede influir en su reactividad y funcionalidad en formulaciones industriales, alimenticias o farmacéuticas [28].

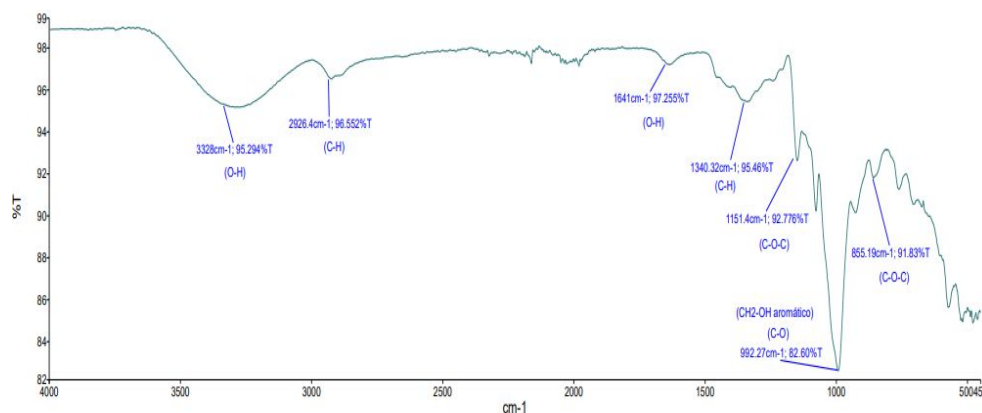


Figura 3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) del almidón residual de papa.

3.1. Propiedades mecánicas

3.1.1. Resistencia a la Tracción del Bioplástico

El tratamiento T3 presentó la mayor resistencia a la tracción (0.39 MPa). El tratamiento T2 mostró la menor resistencia a la tracción (0.11 MPa). Por su parte, los tratamientos T1 y T4 se ubicaron en grupos intermedios, con resistencias de 0.21 MPa y 0.27 MPa, respectivamente, lo que indica que estos tratamientos producen bioplásticos con resistencia moderada (Figure 4). El aumento de óxido de grafeno y almidón mejora las propiedades mecánicas, incrementando la durabilidad de los bioplásticos, como se observa en los tratamientos T3 y T4. Altas cantidades de almidón refuerzan la matriz del bioplástico [29,30]. Estos hallazgos son consistentes con estudios que indican que el óxido de grafeno, en combinación con biopolímeros, mejora la resistencia debido a su capacidad para crear una red estructural dentro de la matriz de almidón [31,32].

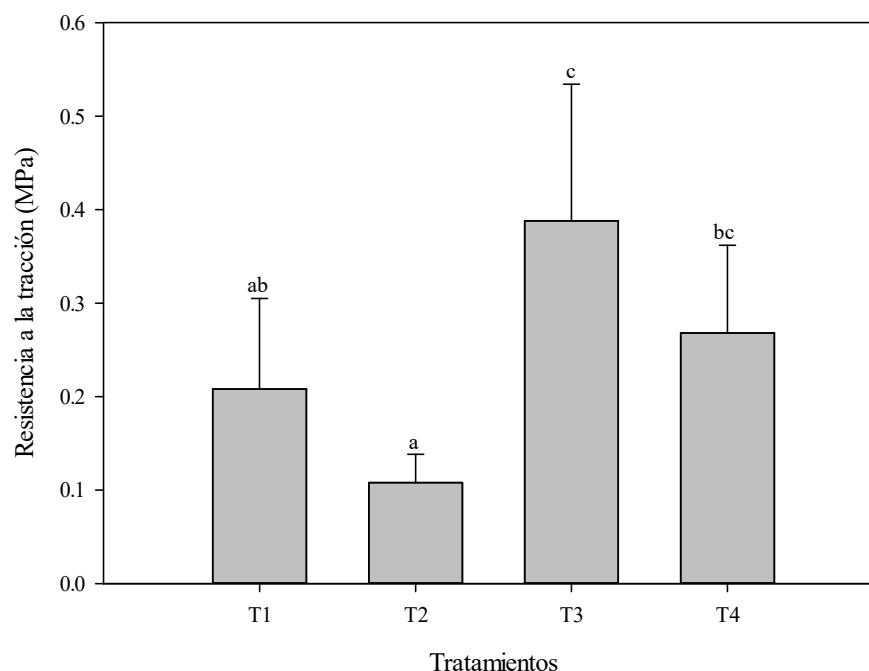


Figura 4. Resistencia a la tracción de bioplásticos procesados con almidón residual de cáscara de papa. Los valores con letras diferentes dentro del mismo grupo indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

3.1.2. Elongación del Bioplástico

Los valores de elongación entre los tratamientos de bioplásticos muestran diferencias en flexibilidad. El tratamiento T2 presentó el menor porcentaje de elongación (10.29%), lo que indica que este bioplástico es menos flexible que los demás tratamientos. Por otro lado, los tratamientos T4, T3 y T1 mostraron porcentajes de elongación de 17.71%, 17.73% y 19.61%, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos (Figure 5). Por lo tanto, los tratamientos T1, T3 y T4 producen bioplásticos con mayor capacidad de deformación antes de romperse, lo cual podría estar relacionado con una mayor interacción entre el almidón y el óxido de grafeno, así como con las proporciones añadidas de glicerol (10 g), ácido acético al 30% (5 g) y agua destilada (80 g), que mejoran la flexibilidad del bioplástico.

El tratamiento T1, con 0.045 g de óxido de grafeno y 8 g de almidón, mostró la mayor elongación (19.61%), lo que indica que una menor cantidad de óxido de grafeno y almidón en la matriz del bioplástico favorece su flexibilidad. El óxido de grafeno en bajas concentraciones mejora la elongación debido a su dispersión homogénea, evitando una alta rigidez en la estructura del bioplástico [33]. Además, la mayor cantidad de almidón en los tratamientos T3 y T4, a pesar de tener mayores concentraciones de óxido de grafeno, también contribuye a un comportamiento flexible, destacando la interacción entre ambos componentes para optimizar la elongación del bioplástico [34]. Estos resultados son relevantes para el diseño de bioplásticos que requieran características específicas de elongación para aplicaciones industriales.

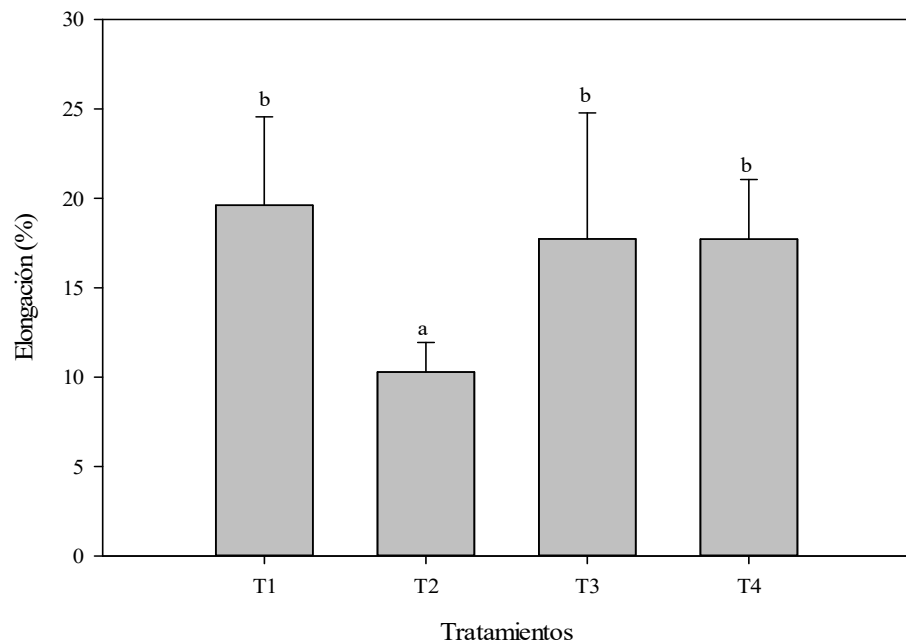


Figura 5. Porcentaje de elongación de bioplásticos procesados con almidón residual de cáscara de papa y óxido de grafeno. Letras diferentes dentro del mismo grupo indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

3.1. Grupos funcionales en bioplásticos

La Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) revela la presencia de diversos grupos funcionales en las películas de bioplástico elaboradas a partir de almidón y óxido de grafeno (Figura 6). Los picos observados a 3301 cm^{-1} y 2924 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento de los enlaces O-H y C-H, respectivamente, confirmando la presencia de grupos hidroxilo y metilo en la estructura del bioplástico. El pico a 1654 cm^{-1} está asociado con enlaces C=O, característicos de los grupos carbonilo, mientras que el pico a 1021 cm^{-1} está relacionado con enlaces C-O, comunes en polisacáridos como el almidón[35,36].

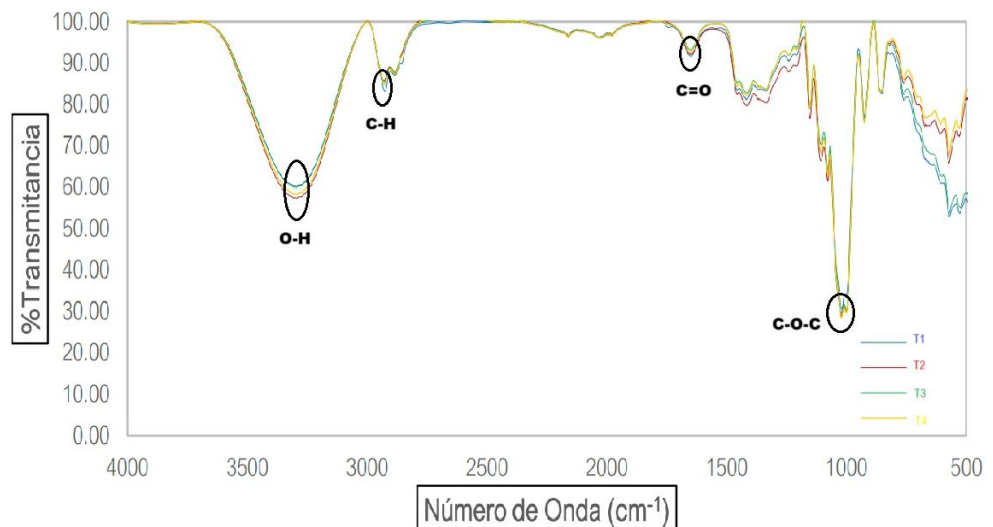


Figura 6. Grupos funcionales del almidón residual de cáscara de papa mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

La similitud en los espectros de los diferentes tratamientos indica una composición química comparable entre ellos, aunque pequeñas variaciones en la intensidad y posición de algunos picos indican diferencias en la concentración o conformación de ciertos grupos funcionales. Estas variaciones podrían deberse a ajustes en el procesamiento de cada muestra, afectando la organización estructural del almidón o la presencia de impurezas [35,36].

3.1. Contenido de humedad del bioplástico

El contenido de humedad de los bioplásticos procesados con almidón residual de cáscara de papa y óxido de grafeno muestra diferencias significativas entre los tratamientos (Figure 7). El tratamiento T3 presenta el menor contenido de humedad (4.46%), mientras que el tratamiento T4 registra el más alto (7.48%). Estos resultados indican que la combinación de una mayor cantidad de óxido de grafeno (0.065 g) y almidón (10 g) en T4 contribuye a una mayor retención de agua, debido a la capacidad del óxido de grafeno para interactuar con el agua, mejorando la retención de humedad en la matriz del bioplástico [37].

Por otro lado, el tratamiento T3, que contiene una menor cantidad de óxido de grafeno (0.045 g) y una mayor proporción de almidón (10 g), presenta el menor contenido de humedad, lo que probablemente esté relacionado con una interacción hidrofílica reducida debido a la ausencia de mayores cantidades de óxido de grafeno[38]. Estos resultados indican que tanto el contenido de óxido de grafeno como la proporción de almidón influyen directamente en la capacidad de los bioplásticos para retener humedad, lo cual es relevante para aplicaciones en empaques donde el control de la humedad es un requisito [39].

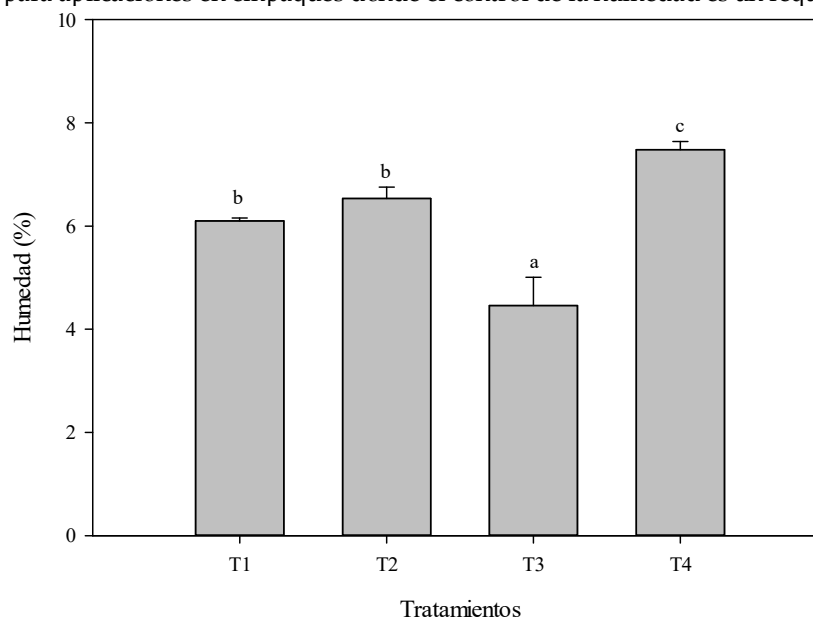


Figura 7. Porcentaje de contenido de humedad de bioplásticos procesados con almidón residual de cáscara de papa y óxido de grafeno. Letras diferentes dentro del mismo grupo indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

3.1. Solubilidad del bioplástico

Los resultados de solubilidad de los bioplásticos procesados con almidón residual de cáscara de papa y óxido de grafeno muestran una estrecha relación entre la cantidad de óxido de grafeno y almidón con la solubilidad del bioplástico (Figure 8). Los tratamientos con mayores cantidades de almidón (T3 y T4) mostraron un aumento significativo en la solubilidad, con valores de 43.32% y 56.79%, respectivamente, en comparación con los tratamientos con menor contenido de almidón (T1 y T2), que tuvieron solubilidades de

39.45% y 53.05%. Este comportamiento se debe a la interacción sinérgica entre el óxido de grafeno y el almidón, donde el óxido, gracias a su alta área superficial específica y propiedades estructurales, facilita la dispersión del almidón y su interacción con el agua, mejorando así la solubilidad del bioplástico [23,24].

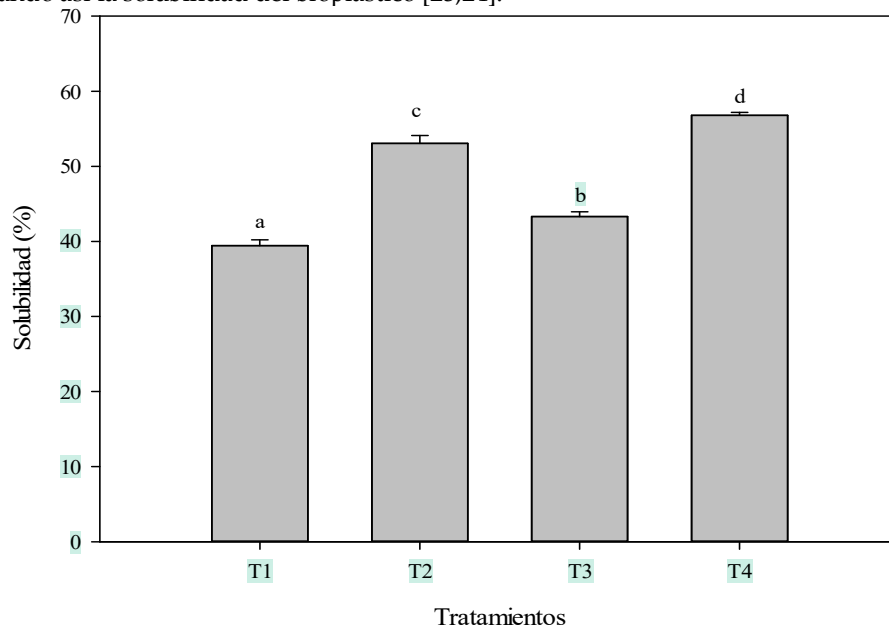


Figure 8. Solubility percentage of bioplastics processed with residual potato starch and graphene oxide. Different letters within the same group denote significant differences ($p < 0.05$).

Este aumento en la solubilidad con el incremento de óxido de grafeno y almidón es consistente con estudios que han demostrado que el óxido de grafeno altera la estructura del almidón, promoviendo una mayor absorción de agua y mejorando las propiedades de solubilidad de los bioplásticos [39]. Por otro lado, la mayor proporción de óxido de grafeno contribuye a una mejor dispersión dentro de la matriz de almidón, facilitando una mayor desintegración y, por ende, una mayor solubilidad, lo que resalta la importancia de optimizar la proporción de estos dos componentes para obtener bioplásticos con características deseadas para aplicaciones biodegradables [40].

3.1. Biodegradación del bioplásticos

La biodegradación de los bioplásticos procesados con almidón residual de cáscara de papa y óxido de grafeno muestra un aumento progresivo en la degradación con el tiempo (Figure 9). El tratamiento T4 presentó la mayor biodegradabilidad a lo largo del estudio de 30 días, alcanzando un 90.17% al final del período. Este tratamiento, que contiene una mayor cantidad de óxido de grafeno (0.065 g) y almidón (10 g), mostró un incremento significativo en la biodegradabilidad en comparación con los otros tratamientos, en los cuales la degradación fue más lenta [24]. Por su parte, el tratamiento T1 (con 0.045 g de óxido de grafeno y 8 g de almidón) presentó la tasa de biodegradación más baja al inicio, pero con un aumento gradual que alcanzó el 84.83% al día 30.

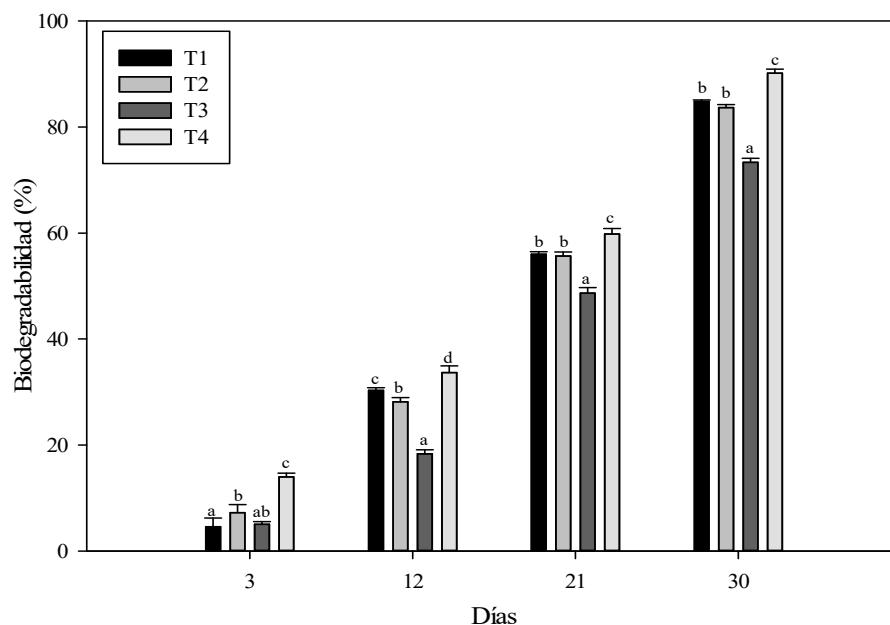


Figura 9. Porcentaje de biodegradabilidad de bioplásticos procesados con almidón residual de cáscara de papa y óxido de grafeno. Letras diferentes dentro del mismo grupo indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los tratamientos T2 (0.065 g de óxido de grafeno y 8 g de almidón) y T3 (0.045 g de óxido de grafeno y 10 g de almidón) también experimentaron una biodegradabilidad significativa, con porcentajes de degradación del 83.67% y 73.33% al final del estudio, respectivamente. Estos resultados indican que la presencia de óxido de grafeno acelera el proceso de biodegradación, lo cual es consistente con estudios que sugieren que el óxido de grafeno facilita la interacción del bioplástico con los microorganismos responsables de la degradación, debido a su alta área superficial y capacidad para mejorar las propiedades de dispersión y humectación del material [41].

Estos hallazgos sobre la biodegradabilidad de los bioplásticos destacan la influencia positiva del óxido de grafeno en la degradabilidad de los bioplásticos a base de almidón de papa, haciéndolos más adecuados para aplicaciones ecológicas y sostenibles [39,41]. Además, el almidón también participa en la degradabilidad de los bioplásticos, y su efecto está influenciado tanto por la cantidad utilizada como por la presencia de otros aditivos que pueden modificar su estructura y su interacción con los microorganismos descomponedores [32,42].

4. Conclusiones

Los bioplásticos que incorporan mayores proporciones de almidón y óxido de grafeno (T3 y T4) presentan una mayor resistencia a la tracción (0.39 MPa y 0.27 MPa, respectivamente) y una flexibilidad mejorada, con una elongación del 19.61%. Las propiedades de humedad y solubilidad también dependen de la proporción de almidón a óxido de grafeno, siendo el tratamiento T4 el que muestra la mayor retención de humedad (7.48%) y solubilidad (56.79%), mientras que T3 presenta una menor retención de humedad (4.46%) y mayor solubilidad. En cuanto a la biodegradabilidad, el tratamiento T4 demuestra la mayor degradación, alcanzando un 90.17% al final de los 30 días, lo que indica que el óxido de grafeno promueve la aceleración de la biodegradación del bioplástico. Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar las proporciones de almidón a óxido de grafeno para desarrollar bioplásticos con propiedades mejoradas, adecuados para diversas aplicaciones industriales y ecológicas.

Agradecimientos:

Los autores desean agradecer a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión por las facilidades brindadas.

References

1. Álvarez PA, Luna-Pabello VM, Ussa-Garzón JE, Maciel-Cerda A. Biodegradability of a bioplastic film from tamarind xyloglucan in composting bioreactors. *DYNA* [Internet]. 2021;88(218):143–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v88n218.90468>
2. Andrady AL. Persistence of Plastic Litter in the Oceans. In 2016.
3. Barnes SJ. Understanding plastics pollution: The role of economic development and technological research. *Environ Pollut* [Internet]. 2019;249:812–21. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.108>
4. Imoisili PE, Jen T-C. Synthesis and characterization of bioplastic films from potato peel starch; effect of glycerol as plasticizer. *Mater Today Proc* [Internet]. 2023;(xxxx). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.565>
5. Folino A, Pangallo D, Calabrò PS. Assessing bioplastics biodegradability by standard and research methods: Current trends and open issues. *J Environ Chem Eng* [Internet]. 2023;11(2). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109424>
6. Talja RA, Peura M, Serimaa R, Jouppila K. Effect of amylose content on physical and mechanical properties of potato-starch-based edible films. *Biomacromolecules* [Internet]. 2008;9(2):658–63. Available from: <https://doi.org/10.1021/bm700654h>
7. Shafqat A, Al-Zaqri N, Tahir A, Alsalmeh A. Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi J Biol Sci* [Internet]. 2021;28(3):1739–49. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.015>
8. Pineda-Gomez P, Ipiá-Achury DF, Rodríguez-García ME. Effect of ultrasonically stimulated potato germination during soaking on the physicochemical properties of starch and its use in edible films. *Int J Biol Macromol* [Internet]. 2024;277(P4):134508. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134508>
9. Thakur R, Pristijono P, Scarlett CJ, Bowyer M, Singh SP, Vuong Q V. Starch-based films: Major factors affecting their properties. *Int J Biol Macromol* [Internet]. 2019;132:1079–89. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190>
10. Puca M, Tinoco OR, Canché G, Duarte S, Neira MG. Obtaining and characterization of bioplastics based on potato starch, aloe, and graphene. *Polimeros* [Internet]. 2022;32(4):e2022037. Available from: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220084>
11. Ramanathan T, Abdala AA, Stankovich S, Dikin DA, Herrera-Alonso M, Piner RD, et al. Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites. *Nat Nanotechnol* [Internet]. 2008;3(6):327–31. Available from: <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.96>
12. Hasan M, Gopakumar DA, Olaiya NG, Zarlada F, Alfian A, Aprinasari C, et al. Evaluation of the thermomechanical properties and biodegradation of brown rice starch-based chitosan biodegradable composite films. *Int J Biol Macromol* [Internet]. 2020;156:896–905. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.039>
13. Alves Z, Ferreira NM, Ferreira P, Nunes C. Design of heat sealable starch-chitosan bioplastics reinforced with reduced graphene oxide for active food packaging. *Carbohydr Polym* [Internet]. 2022;291(April). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119517>
14. Balandin AA, Ghosh S, Bao W, Calizo I, Teweldebrhan D, Miao F, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Lett* [Internet]. 2008;8(3):902–7. Available from: <https://doi.org/10.1021/nl0731872>
15. Gonçalves de Moura I, Vasconcelos de Sá A, Lemos Machado Abreu AS, Alves Machado AV. Bioplastics from agro-wastes for food packaging applications [Internet]. *Food Packaging*. Elsevier Inc.; 2017. 223–263 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-804302-8/00007-8>
16. Jiménez-Rosado M, Rubio-Valle JF, Pérez-Puyana V, Guerrero A, Romero A. Comparison between pea and soy protein-based bioplastics obtained by injection molding. *J Appl Polym Sci* [Internet]. 2021;138(20):1–10. Available from: <https://doi.org/10.1002/app.50412>

- 450 17. Oluwasina OO, Adebayo MA, Akinsola MO, Olorunfemi TE, Olajide JD. Influence of 2-hydroxyethyl terephthalate from waste
451 polyethylene plastic on the properties of starch-BHET bioplastics. *Waste Manag Bull* [Internet]. 2024;2(1):203–13. Available from:
452 <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.01.008>
- 453 18. Cao F, Zheng M, Wang L, Lu H, Wang Y, Quek SY, et al. Amylose and amylopectin contents affect OSA-esterified corn starch's
454 solubilizing efficacy and action mode on hesperetin. *Lwt* [Internet]. 2023;183(May):114904. Available from:
455 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114904>
- 456 19. Song W, Wu N, He Y, Zhao H, Xu J, Ren L. Intelligent color changing packaging film based on esterified starch and black rice
457 anthocyanins. *Food Chem X* [Internet]. 2024;24(October):101930. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101930>
- 458 20. He HJ, Wang Y, Wang Y, Liu H, Zhang M, Ou X. Simultaneous quantifying and visualizing moisture, ash and protein
459 distribution in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] by NIR hyperspectral imaging. *Food Chem X* [Internet].
460 2023;18(March):100631. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100631>
- 461 21. Santin A, Spatola Rossi T, Morlino MS, Gupte AP, Favaro L, Morosinotto T, et al. Autotrophic poly-3-hydroxybutyrate
462 accumulation in *Cupriavidus necator* for sustainable bioplastic production triggered by nutrient starvation. *Bioresour Technol*
463 [Internet]. 2024;406(July):131068. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131068>
- 464 22. Kanagesan K, Abdulla R, Derman E, Sabullah MK, Govindan N, Gansau JA. A sustainable approach to green algal bioplastics
465 production from brown seaweeds of Sabah, Malaysia. *J King Saud Univ - Sci* [Internet]. 2022;34(7):102268. Available from:
466 <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102268>
- 467 23. Yang J, Xu S, Chee CY, Ching KY, Wei Y, Wang R, et al. Influence of starch silylation on the structures and properties of
468 starch/epoxidized soybean oil-based bioplastics. *Int J Biol Macromol* [Internet]. 2024;258:129037. Available from:
469 <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129037>
- 470 24. Tan SX, Ong HC, Andriyana A, Lim S, Pang YL, Kusumo F, et al. Characterization and Parametric Study on Mechanical
471 Properties Enhancement in Biodegradable Chitosan-Reinforced Starch-Based Bioplastic Film. *Polymers (Basel)* [Internet].
472 2022;14(2):1–21. Available from: <https://doi.org/10.3390/polym14020278>
- 473 25. Kim EJ, Kim HS. Physicochemical properties of dehydrated potato parenchyma cells with ungelatinized and gelatinized
474 starches. *Carbohydr Polym* [Internet]. 2015;117:845–52. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.038>
- 475 26. Huang G, Wang Q, Zhong Q, Chen Y, Yang X, Jin W, et al. Improving color and digestion resistibility of 3D-printed ready-to-
476 eat starch gels using anthocyanins. *LWT - Food Sci Technol* [Internet]. 2024;116990. Available from:
477 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116990>
- 478 27. Krystyan M, Khachatryan G, Grabacka M, Krzan M, Witczak M. Starch / Chitosan Polymer Composites Modified by Graphene
479 Oxide , Designed as New Bionanomaterials. *Polymers (Basel)* [Internet]. 2021;13:2327. Available from:
480 <https://doi.org/10.3390/polym13142327>
- 481 28. Dankar I, Haddarah A, Omar FEL, Pujolà M, Sepulcre F. Characterization of food additive-potato starch complexes by FTIR
482 and X-ray diffraction. *Food Chem* [Internet]. 2018;260:7–12. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.138>
- 483 29. Chivrac F, Pollet E, Avérous L. Progress in nano-biocomposites based on polysaccharides and nanoclays. *Mater Sci Eng R*
484 *Reports* [Internet]. 2009;67(1):1–17. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.09.002>
- 485 30. Hari BS, Mahesh Kumar K V., Krishnamurthy K, Sathish Kumar P, Gobinath VK, Sachinbala R, et al. Influence of graphene
486 oxide on the morphological and mechanical behaviour of compatibilized low density polyethylene nanocomposites. *Mater*
487 *Today Proc* [Internet]. 2020;39(xxxx):1487–93. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.378>
- 488 31. Jayarathna S, Andersson M, Andersson R. Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics Applications.
489 *Polymers (Basel)* [Internet]. 2022;14(21):1–24. Available from: <https://doi.org/10.3390/polym14214557>
- 490 32. Amaraweera SM, Gunathilake C, Gunawardene OHP, Fernando NML, Wanninayaka DB, Dassanayake RS, et al. Development
491 of starch-based materials using current modification techniques and their applications: A review. *Molecules* [Internet].

- 2021;26(22):1–30. Available from: <https://doi.org/10.3390/molecules26226880>
33. Takkalkar P, Ganapathi M, Dekiwadia C, Nizamuddin S, Griffin G, Kao N. Preparation of Square-Shaped Starch Nanocrystals/Poly(lactic Acid Based Bio-nanocomposites: Morphological, Structural, Thermal and Rheological Properties. Waste and Biomass Valorization [Internet]. 2019;10(11):3197–211. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-018-0372-0>
34. Li R, Liu C, Ma J. Studies on the properties of graphene oxide-reinforced starch biocomposites. Carbohydr Polym [Internet]. 2011;84(1):631–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.041>
35. Nazar M, Hasan M, Wirjosentono B, Gani BA. Fabrication and characterization of bio-nanocomposite from sweet potato starch and Moringa oleifera leaf extract loaded with carbon quantum dots from Coffea arabica grounds. Results Eng [Internet]. 2024;23(June):102448. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102448>
36. Mollik SI. Synthesis and Characterization of Bio-Degradable Starch Based Graphene Nanocomposites. 2019;121. Available from: [http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5454/Full Thesis.pdf?sequence=1](http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5454/Full%20Thesis.pdf?sequence=1)
37. Zhang K, Zhou M, Cheng F, Lin Y, Zhu P, Li J, et al. Preparation and characterization of starch-based nanocomposites reinforced by graphene oxide self-assembled on the surface of silane coupling agent modified cellulose nanocrystals. Int J Biol Macromol [Internet]. 2022;198:187–93. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.136>
38. Javidi Z, Nazockdast H, Ghasemi I. Effect of graphene/graphene oxide on microstructure development and its impact on electrical conductivity and shape recovery behavior of plasticized starch-based nano-biocomposites. J Polym Res [Internet]. 2022;29(3). Available from: <https://doi.org/10.1007/s10965-022-02937-3>
39. Amri A, Hanifa R, Evelyn, Awaltanova E. The effects of graphene oxide functionalization on the properties of sago starch-based bioplastics. IOP Conf Ser Mater Sci Eng [Internet]. 2018;420(1). Available from: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012061>
40. Barra A, Santos JDC, Silva MRF, Nunes C, Ruiz-Hitzky E, Gonçalves I, et al. Graphene derivatives in biopolymer-based composites for food packaging applications. Nanomaterials [Internet]. 2020;10(10):1–32. Available from: <https://doi.org/10.3390/nano10102077>
41. Ferreira WH, Andrade CT. Physical and Biodegradation Properties of Graphene Derivatives/Thermoplastic Starch Composites. Polysaccharides [Internet]. 2021;2(3):582–93. Available from: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030035>
42. Xie D, Zhang R, Zhang C, Yang S, Xu Z, Song Y. A novel, robust mechanical strength, and naturally degradable double crosslinking starch-based bioplastics for practical applications. Int J Biol Macromol [Internet]. 2023;253(4):126959. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126959>