

Desarrollo de un bioplástico a partir de pectina extraída de la cáscara de manzana (*Malus domestica*)

Development of a bioplastic from pectin extracted from apple (*Malus domestica*) peel

Isabel del Pilar Sotelo Pahuacho ^{1,3}, Mayli Alicia Espinoza Romero ^{1,3}, Nancy Elisa Saavedra Mallma ^{1,3}.

¹Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo. Perú. ²✉ e_2018200530D@uncp.edu.pe; ³✉ e_2018200513E@uncp.edu.pe; ⁴✉ nsaavedra@uncp.edu.pe



DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v73n4.119744>

2024 | 73-4 p 448-459 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2025-04-08 Acep.: 2026-14-04

Resumen

La pectina es un biopolímero biodegradable obtenido de subproductos agroindustriales y representa una alternativa sostenible a los plásticos derivados del petróleo. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un bioplástico a partir de la pectina extraída de la cáscara de manzana, optimizando su proceso de extracción y su formulación. Para esto, se empleó un diseño factorial completo (4×3) con modelo cuadrático con el fin de evaluar los efectos de la temperatura, pH, tiempo y relación sólido-líquido sobre el rendimiento. Las condiciones óptimas (85 °C, pH 1, 1:30 y 45 min) permitieron obtener un rendimiento del 38.90 %. El análisis FTIR-ATR identificó los grupos estructurales característicos de la pectina: hidroxilos (-OH), alquilos (-CH/-CH₂), carbonilos (-C=O), carboxilatos ionizados (-COO⁻) y enlaces C-O. Posteriormente, la pectina presentó 11.17 % de grupos metoxilo, 69.89 % de ácido galacturónico y un grado de esterificación de 88.74 %. Para la elaboración del bioplástico se utilizó un diseño factorial (3×3) variando las concentraciones de pectina y glicerina. La formulación óptima (3 % de pectina y 4.5 % de glicerina) produjo un material con 0.10 mm de espesor, resistencia a la tracción de 2.383 MPa y una elongación de 10.96 %. El material presentó 78.93 % de sólidos volátiles y niveles de metales pesados por debajo de los límites de cuantificación. Además, mostró una alta biodegradabilidad, con desintegración completa en 90 días bajo compostaje. En conclusión, se obtuvo un bioplástico biodegradable con propiedades mecánicas y químicas adecuadas, evidenciando el potencial de la cáscara de manzana para desarrollar empaques sostenibles.

Palabras claves: biodegradabilidad, economía circular, superficie respuesta, residuos agroindustriales.

Abstract

Pectin is a biodegradable biopolymer obtained from agro-industrial by-products and represents a sustainable alternative to petroleum-derived plastics. The objective of this study was to develop a bioplastic from pectin extracted from apple peel by optimizing both the extraction and formulation processes. A full factorial design (4×3) with a quadratic model was applied to evaluate the effects of temperature, pH, extraction time, and solid-liquid ratio on pectin yield. Optimal extraction conditions (85 °C, pH 1, 1:30 solid-liquid ratio, and 45 min) resulted in a yield of 38.90 %. FTIR-ATR analysis confirmed the presence of characteristic pectin functional groups, including hydroxyl (-OH), alkyl (-CH/-CH₂), carbonyl (-C=O), ionized carboxylate (-COO⁻), and C-O linkages. The extracted pectin contained 11.17 % methoxyl groups, 69.89 % galacturonic acid, and exhibited a degree of esterification of 88.74 %. For bioplastic preparation, a factorial design (3×3) was employed to evaluate the effects of pectin and glycerol concentrations. The optimal formulation (3 % pectin and 4.5 % glycerol) produced bioplastic with a thickness of 0.10 mm, tensile strength of 2.383 MPa, and elongation at break of 10.96 %. The material exhibited 78.93 % volatile solids and heavy metal contents below quantification limits. Additionally, the bioplastic demonstrated high biodegradability, achieving complete disintegration after 90 days under composting conditions. Overall, a biodegradable bioplastic with suitable mechanical and chemical properties was obtained, highlighting the potential of apple peel as a sustainable resource for sustainable packaging applications.

Keywords: Agro-industrial residues, biodegradability, bioplastic, circular economy, response surface.

Introducción

Los plásticos derivados del petróleo son ampliamente utilizados por su bajo costo, resistencia y facilidad de procesamiento (Nayanathara y Ratnayake, 2024; Zhang *et al.*, 2023), y la industria alimentaria representa uno de los principales consumidores, debido a su aplicación en el envasado, embalaje y transporte (Ncube *et al.*, 2020). No obstante, su limitada reciclabilidad ha generado un impacto ambiental crítico. Desde 1950, el 91 % de los plásticos desechados no ha sido reciclado, y cerca del 32 % termina acumulado en ecosistemas, liberando microplásticos y sustancias tóxicas con efectos negativos sobre la salud y la biodiversidad (Williams y Rangel-Buitrago, 2022). De mantenerse esta tendencia, para 2050 los residuos plásticos podrían alcanzar los 26 mil millones de toneladas, con 11 mil millones persistiendo en ambientes naturales (Williams y Rangel-Buitrago, 2022; Zhang *et al.*, 2023).

El desarrollo de materiales biodegradables provenientes de biomatrices surge como una estrategia clave para mitigar esta problemática. Polímeros como almidón, celulosa, pectina, queratina, quitina, gelatina y polihidroxicanoatos se han propuesto como alternativas sostenibles (Faizan *et al.*, 2021), aunque su síntesis industrial suele requerir pretratamientos complejos que reducen su eficiencia (Negrete-Bolagay *et al.*, 2024; Zimmermann *et al.*, 2020). En este contexto, la valorización de subproductos agroindustriales constituye un enfoque alineado con la economía circular, entendida como un modelo que busca minimizar residuos, prolongar el uso de los materiales y reinsertarlos en nuevas cadenas de valor (Mutmainna *et al.*, 2025).

En el mundo, se desperdicia más del 40 % de las frutas (Li, H. *et al.*, 2022; David Todd y Faour-Klingbeil, 2024) y, en el Perú, el desperdicio anual asciende a 12.8 millones de toneladas, equivalente al 47.6 % del suministro nacional (Bedoya-Perales y Dal' Magro, 2021), siendo las peladuras de frutas, tubérculos y verduras una fracción importante (Cordova-Buiza *et al.*, 2022). Este escenario evidencia la necesidad de estrategias que permitan transformar estos residuos en matrices de valor agregado, entre las que los residuos frutales destacan como recursos potenciales para la producción de bioplásticos (Li, H. *et al.*, 2022).

El presente estudio se basa en un enfoque “de arriba hacia abajo” para sintetizar bioplásticos biodegradables y reciclables a partir de la cáscara de manzana (Zhang *et al.*, 2023). La eficiencia de extracción de pectina depende de variables como temperatura, pH, tiempo y relación sólido-líquido, las cuales determinan el rendimiento y la calidad del polisacárido (Mamiru y Gonfa, 2023). Asimismo, la formulación del bioplástico se ve influida por la proporción de pectina y glicerina, que condiciona propiedades como espesor, flexibilidad y resistencia mecánica (Syarifuddin *et al.*, 2025). Cuando se

consideran aplicaciones alimentarias, es necesario evaluar metales pesados y flúor por su potencial migración hacia los alimentos (Eti *et al.*, 2023). En ese sentido, se planteó desarrollar un bioplástico biodegradable a partir de la pectina extraída de la cáscara de manzana mediante la optimización de las condiciones de extracción y de formulación, con el fin de obtener un material con propiedades mecánicas y químicas adecuadas y demostrar la viabilidad del aprovechamiento de residuos frutales en la producción de materiales sostenibles.

Materiales y métodos

Origen y preparación de la materia prima

Se emplearon cáscaras de manzana variedad delicia (*Malus domestica*), obtenidas como subproducto posprocesamiento en una planta artesanal de jugos en Mala (12°39' S, 76°45' O), Cañete, Lima, Perú. Su uso se justificó por el enfoque de economía circular y por la necesidad de evaluar posibles contaminaciones de metales pesados y flúor asociadas al procesamiento previo. Las cáscaras fueron lavadas, deshidratadas hasta el 8.91 % de humedad (OHAUS MB90, EE. UU., 130 °C, 12.48 min), molidas (IKA M20, Alemania) y tamizadas con mallas n.º 35 y n.º 60 (RETSCH, Alemania).

Análisis microbiológico de la muestra

El análisis microbiológico de las cáscaras se realizó mediante recuento en placa AOAC (2002), aplicando los métodos 991.14 para coliformes totales, 966.23.C para aerobios mesófilos y 997.02 para mohos.

Preparación de la muestra

Extracción de pectina

La extracción siguió a Rahman *et al.* (2023), con modificaciones. Se prepararon soluciones acidificadas (pH 1, 2 y 3) con HCl 37 % (Merck). La mezcla se calentó inicialmente a 70 °C por 15 min y luego la muestra se diluyó en proporciones 1:10, 1:20 y 1:30 (g/mL). Se realizó un segundo calentamiento a 70, 80 o 85 °C durante 15, 30 o 45 min con agitación. El extracto se filtró (Whatman N°1), se precipitó con etanol 96 % (1:1), se refrigeró (4 °C, 24 h), se centrifugó (600 rpm, 15 min; Hettich EBA 200, Alemania), se purificó y se secó (POL-EKO, Polonia, 40 °C, 24 h). El rendimiento se calculó con la Ecuación 1.

$$\text{Rendimiento de pectina (\%)} = \frac{(\text{Cantidad de pectina extraída en g})}{(\text{Cantidad inicial de muestra seca en polvo en g})} \quad (\text{Ec. 1})$$

Caracterización de la pectina

Espectrofotometría infrarroja por FTIR-ATR: se analizó con el uso de un espectrofotómetro infrarrojo PerkinElmer® con accesorio ATR y software Spectrum 10 (EE. UU.) en el rango 380-4000 cm⁻¹, siguiendo la norma ASTM (2021).

Porcentaje de metoxilos, estatificación y ácido anhidrouónico: se realizó según Pérez *et al.* (2022) y Rentería-Ortega *et al.* (2023). Se disolvieron 0.25 g de pectina de cáscara de manzana en 50 mL de una solución etanol/agua (1:20 v/v) con 5 gotas de indicador rojo fenol. La muestra se tituló con NaOH 0.1 N (, mL). Posteriormente, se añadieron 25 mL de NaOH 0.25 N y se calentó agitándola, nuevamente con 5 gotas de rojo fenol, seguidas de 25 mL de HCl 0.25 N, y se realizó una segunda titulación con NaOH 0.1 N (, mL) hasta alcanzar el cambio de color de amarillo a rosa pálido, indicando el punto final. El porcentaje de grupos metoxilo se calculó mediante la Ecuación 2.

$$\text{Metoxilo (\%)} = \frac{0.31 \times V_2 \text{ (mL)} \times 31}{\text{Peso de la muestra (mg)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

La Ecuación 3 se utilizó para calcular el porcentaje de esterificación:

$$\text{Esterificación (\%)} = \frac{V_2 \text{ (mL)}}{V_1 \text{ (mL)} + V_2 \text{ (mL)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

La Ecuación 4 se utilizó para calcular el porcentaje de ácido anhidrouónico:

$$\text{Ácido anhidrouónico (\%)} = \frac{0.1 \times (V_1 + V_2) \text{ (mL)} \times 176}{\text{Peso de la muestra (mg)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde 176 es el peso molecular del ácido anhidrouónico expresado como mg/meq y y fueron los volúmenes utilizados para la primera y segunda titulación, respectivamente.

Elaboración de bioplástico

Se realizó de acuerdo con Listyarini *et al.* (2020). Los componentes (pectina, glicerina y almidón) se tamizaron con malla n.º 60. Las formulaciones incluyeron pectina (1.5-4.5 %), glicerina (1.5-4.5 %) y almidón 2 %. Las mezclas se calentaron en baño maría (BWS-12, China, 85 °C) y se mantuvieron a 70 ± 5 °C bajo agitación (VELP HSC, Italia, 10 min). Se depositaron 5 g en placas Petri y se secaron a 18-21 °C durante 24 h. El espesor se midió con micrómetro digital (Dascua, China).

Caracterización del bioplástico

Espectrofotometría infrarroja por FTIR-ATR

Se efectuó empleando un espectrofotómetro infrarrojo PerkinElmer® equipado con un módulo de reflectancia total atenuada (ATR) y operado mediante el software Spectrum 10 (EE. UU.). Las lecturas se registraron en el rango espectral de 380 a 4000 cm⁻¹, conforme a los lineamientos establecidos por la norma ASTM (2021).

Metales pesados y flúor

Se realizó mediante espectrofotometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), usando un Thermo Scientific iCAP 7000 (EE. UU.), según lo indicado por AOAC (2016) 2015.01. El flúor se cuantificó mediante electrodo selectivo de iones (ISE) conforme a la ISO (1987) 4694:1987.

Sólidos volátiles

Se desarrolló según el método D6400 de la ASTM (2023). Las muestras se secaron en horno a 110 °C durante 1-2 h y luego se sometieron a pirólisis en mufla (Klarstein, Alemania) a 600 °C durante 2 h. El cálculo del porcentaje de sólidos volátiles se determinó aplicando la Ecuación 5.

$$\text{Sólidos volátiles (\%)} = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde W₁ fue la masa de residuo seco y W₂ la masa de residuo después de la ignición.

Propiedades mecánicas

Las pruebas de resistencia a la tracción y elongación se realizaron según la ASTM (2021), siguiendo la práctica estándar D638 y las instrucciones de Nigam *et al.* (2021). Se utilizaron películas del bioplástico de 2.5 × 10 cm.

Biodegradación

Se realizó basado en Wahyuningtiyas y Suryanto (2017), con modificaciones. La muestra se expuso a compost a la intemperie para simular la degradación de un plástico en el suelo. Se utilizaron muestras de 15 cm × 10 cm con una proporción compost:muestra de 6:1. La pérdida de tamaño se evaluó a los 7, 15, 30, 60 y 90 días y la pérdida de peso se calculó con la Ecuación 6.

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \left(\frac{W_0 - W_1}{W_0} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 6})$$

Diseño experimental

La extracción de pectina se optimizó mediante un diseño factorial completo 4×3 con modelo cuadrático, evaluando 81 combinaciones de temperatura (70, 80, 85 °C), pH (1, 2, 3), tiempo (15, 30, 45 min) y relación sólido-líquido (1:10, 1:20, 1:30). La formulación del bioplástico empleó un diseño factorial 2×3 con 9 tratamientos basados en pectina (1.5-4.5 %) y glicerina (1.5-4.5 %). Todas las pruebas se realizaron por triplicado.

Análisis estadístico

Los datos se procesaron en Excel 2021 y DesignExpert™ 12.0. Se aplicaron modelos de superficie de respuesta y ANOVA con $p < 0.05$ para analizar efectos e interacciones de los factores.

Resultados

Los resultados del análisis microbiológico (Tabla 1) evidencian que la cáscara de manzana presenta una carga microbiana mínima, con valores inferiores a 3 UFC/g para coliformes totales y por debajo de 10 UFC/g para aerobios mesófilos y mohos. Estos niveles indican que la materia prima se encontraba en condiciones higiénicas adecuadas para su procesamiento.

Los datos de la Tabla 2 indican que el rendimiento de pectina estuvo fuertemente influenciado por condiciones de alta temperatura, pH ácido, mayor tiempo y una mayor proporción de disolvente. Bajo estas combinaciones, el valor más elevado se alcanzó a 85 °C, pH 1, 45 minutos y una relación 1:30, y se obtuvo un rendimiento de 38.9 %, lo que evidencia que estas condiciones favorecen de manera óptima la solubilización y recuperación del polisacárido.

El ANOVA (Tabla 3) mostró efectos significativos ($p < 0.05$) para temperatura, pH, dilución e interacciones AB, AD, BC y BD. El tiempo no fue significativo. Los términos cuadráticos A^2 y B^2 sí fueron significativos.

Las superficies de respuesta mostradas en la Figura 1 evidencian que el máximo rendimiento de pectina se logró bajo condiciones de alta temperatura, pH fuertemente ácido, mayor tiempo de extracción y la relación sólido-líquido más diluida.

El punto óptimo se alcanzó a 85 °C, pH 1, 45 minutos y una relación 1:30, y se obtuvo un rendimiento de 38.90 %, lo que confirma la eficacia de esta combinación para favorecer la liberación y recuperación del polisacárido.

Los espectros obtenidos para la pectina extraída en condiciones óptimas (Tabla 4 y Figura 2) muestran claramente las señales asociadas a los grupos funcionales característicos de este polisacárido.

Las bandas observadas coinciden con los rangos teóricos reportados para pectinas, lo que confirma su naturaleza ácida y la conservación de su estructura química. Esto evidencia que las condiciones empleadas fueron adecuadas para obtener una pectina con el perfil estructural esperado.

Los resultados presentados en la Tabla 5 evidencian que la pectina obtenida posee un contenido de metoxilos y un grado de esterificación característicos de una pectina de alto metoxilo, lo que indica un adecuado nivel de estructuración del polisacárido. Esta clasificación es especialmente favorable para

Tabla 1. Análisis microbiológico de la cáscara de manzana

Análisis	Resultado (UFC/g)
Coliformes totales	< 3
Aerobios mesófilos	< 10
Mohos	< 10

Tabla 2. Rendimiento de extracción de pectina

T (°C)	pH	Tiempo (min)	Rendimiento de pectina (%)		
			01:10	01:20	01:30
70	1	15	1.8 ± 0.016	5.8 ± 0.035	7.0 ± 0.012
70	1	30	2.5 ± 0.017	9.8 ± 0.049	9.2 ± 0.035
70	1	45	2.8 ± 0.033	6.2 ± 0.025	10.8 ± 0.032
70	2	15	3.4 ± 0.036	5.8 ± 0.035	4.3 ± 0.009
70	2	30	5.2 ± 0.037	7.6 ± 0.014	4.0 ± 0.017
70	2	45	5.6 ± 0.033	7.2 ± 0.010	5.6 ± 0.08
70	3	15	5.0 ± 0.018	8.4 ± 0.07	6.7 ± 0.025
70	3	30	6.2 ± 0.011	12.0 ± 0.018	5.6 ± 0.038
70	3	45	7.4 ± 0.025	1.0 ± 0.013	7.2 ± 0.039
80	1	15	2.0 ± 0.023	8.0 ± 0.013	10.2 ± 0.032
80	1	30	5.2 ± 0.022	7.0 ± 0.037	16.7 ± 0.024
80	1	45	2.8 ± 0.020	13.0 ± 0.015	24.4 ± 0.051
80	2	15	5.1 ± 0.026	6.8 ± 0.012	8.8 ± 0.040
80	2	30	5.3 ± 0.027	4.0 ± 0.019	5.2 ± 0.033
80	2	45	6.5 ± 0.008	6.4 ± 0.024	6.8 ± 0.012
80	3	15	4.5 ± 0.015	11.2 ± 0.017	12.0 ± 0.006
80	3	30	4.0 ± 0.034	6.0 ± 0.027	10.8 ± 0.035
80	3	45	4.8 ± 0.021	8.8 ± 0.021	12.6 ± 0.039
85	1	15	4.6 ± 0.018	18.0 ± 0.014	31.1 ± 0.014
85	1	30	4.6 ± 0.026	16.0 ± 0.047	24.0 ± 0.021
85	1	45	2.4 ± 0.052	24.0 ± 0.024	38.9 ± 0.033
85	2	15	5.6 ± 0.001	4.4 ± 0.034	24.0 ± 0.049
85	2	30	5.8 ± 0.048	4.0 ± 0.046	18.0 ± 0.044
85	2	45	3.8 ± 0.025	8.8 ± 0.013	11.4 ± 0.028
85	3	15	5.6 ± 0.05	5.2 ± 0.012	22.2 ± 0.018
85	3	30	5.2 ± 0.047	6.8 ± 0.039	22.8 ± 0.036
85	3	45	3.0 ± 0.41	7.2 ± 0.012	15.6 ± 0.016

Tabla 3. ANOVA del modelo cuadrático para el rendimiento de pectina

Tratamientos	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor p
Modelo	3004.55	14	214.61	14.72	< 0.0001*
A-Temperatura	592.65	1	592.65	40.65	< 0.0001*
B-pH	88.68	1	88.68	6.08	0.0163*
C-Tiempo	6.33	1	6.33	0.4342	0.5122 ^{NS}
D-Dilución	982.64	1	982.64	67.39	< 0.0001*
AB	128.91	1	128.91	8.84	0.0041*
AC	1.44	1	1.44	0.0986	0.7546 ^{NS}
AD	532.26	1	532.26	36.50	< 0.0001*
BC	69.48	1	69.48	4.77	0.0326*
BD	151.72	1	151.72	10.41	0.0020*
CD	0.8637	1	0.8637	0.0592	0.8085 ^{NS}
A ²	98.80	1	98.80	6.78	0.0114*
B ²	153.12	1	153.12	10.50	0.0019*
C ²	4.01	1	4.01	0.2752	0.6016 ^{NS}
D ²	8.79	1	8.79	0.6029	0.4403 ^{NS}
Residual	962.31	66	14.58		
Corridas Total	3966.86	80			

(*) Significativo; (NS) no significativo; (gl) grados de libertad; (ANOVA) análisis de varianza; nivel de significancia $p < 0.05$.

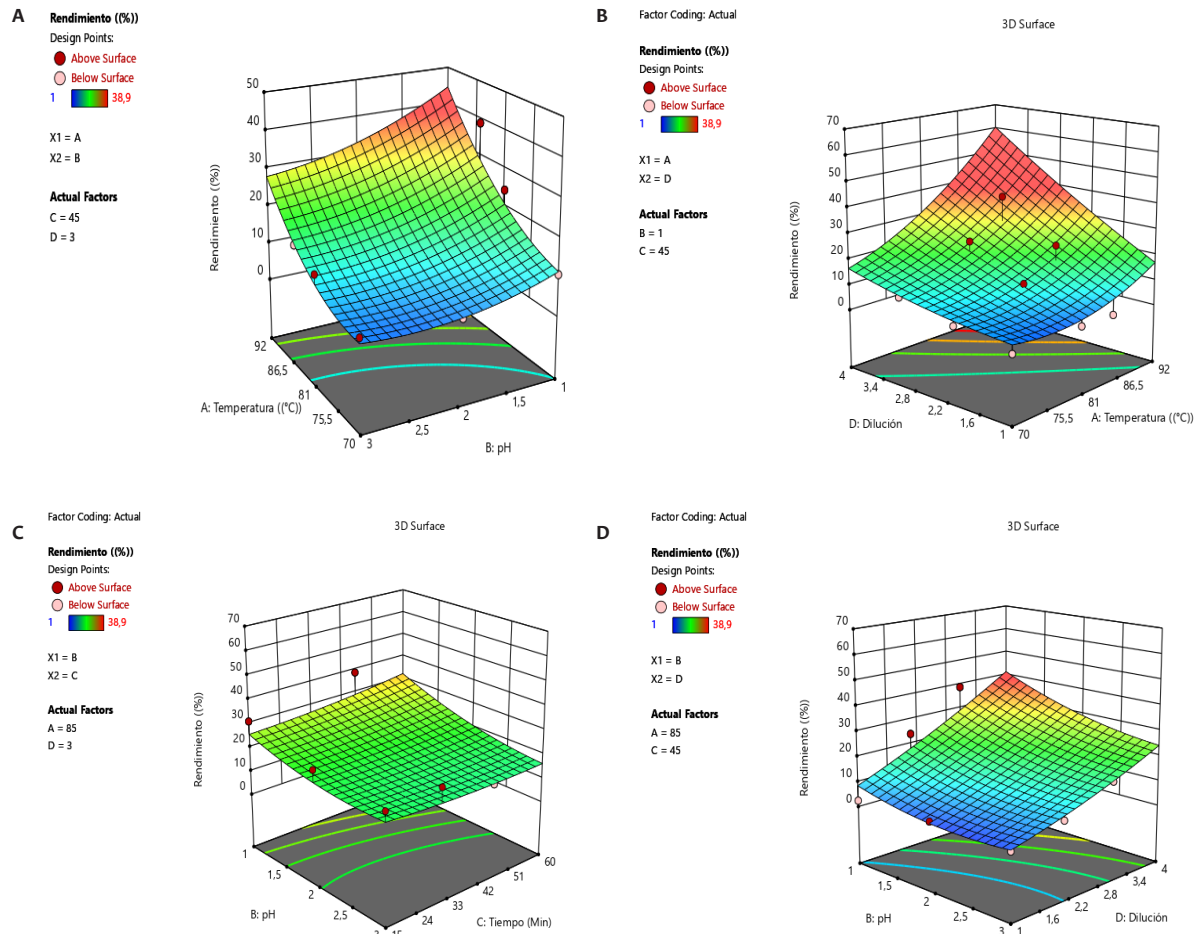


Figura 1. Superficies de respuesta del efecto de temperatura, pH, tiempo y dilución sobre el rendimiento de pectina.

aplicaciones en bioplásticos, debido a su capacidad para formar geles estables en presencia de sacarosa y ácidos, lo que contribuye a mejorar la cohesión y la funcionalidad del material final.

Los datos de la Tabla 6 muestran que las variaciones en la proporción de pectina y glicerina influyen directamente en la masa y el espesor de los bioplásticos obtenidos. La formulación óptima destacó por generar una lámina más gruesa y pesada, lo que refleja una mayor densidad estructural del material. En contraste, la formulación más ligera produjo bioplásticos de menor espesor, lo que evidencia una red polimérica menos compacta.

La Tabla 7 presenta el análisis ANOVA del espesor y peso del bioplástico. En el modelo cuadrático del espesor, la pectina (B) y el término cuadrático de la glicerina (A^2) fueron significativos ($p < 0.05$), mientras que la glicerina (A), la interacción AB y B^2 no lo fueron. En el modelo lineal del peso, la glicerina (A) y la pectina (B) fueron significativas, pero la interacción AB no. Esto sugiere que la pectina influye más en ambas respuestas, mientras que la glicerina afecta significativamente el peso, pero menos el espesor.

En la Figura 3, el modelo cuadrático (a) describe la variación del espesor, mostrando un punto máximo a concentraciones intermedias de glicerina y pectina. En (b), el modelo lineal refleja un aumento progresivo del peso con el incremento de ambos componentes.

Tabla 4. Señales FTIR-ATR de los grupos estructurales de la pectina extraída bajo condiciones óptimas

Grupo funcional	Rango teórico (cm^{-1}) [*]	Resultado experimental (cm^{-1})
-OH	3200 – 3650	3307
-CH/-CH ₂	2850 – 2950	2944
-C=O	1650 – 1750	1730
-COO ⁻	1600 – 1690	1622
-C-O-	990 – 1200	1051

^{*}Rangos tomados de Mabborang *et al.* (2021) y Mecozzi *et al.* (2012).

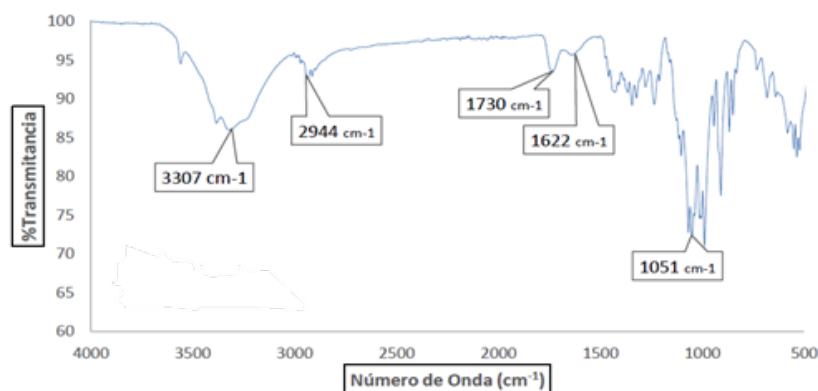


Figura 2. Espectros FTIR-ATR de la pectina.
Fuente: elaboración propia

La optimización del espesor y peso del bioplástico mostró que un bioplástico con 3 % de glicerina y 1.5 % de pectina alcanza el mayor peso (0.83 g) y espesor (0.17 mm), por lo que esta es la combinación más efectiva para maximizar ambas propiedades.

Los resultados presentados en la Tabla 8 y en la Figura 4 evidencian que el bioplástico optimizado conserva los grupos funcionales característicos de matrices basadas en pectina. Las señales observadas corresponden a hidroxilos, grupos alquilo, carbonilos tipo éster, carboxilatos ionizados y enlaces C-O propios de polisacáridos, confirmando la formación de interacciones químicas como enlaces de hidrógeno y uniones éster que sustentan la estructura del material obtenido.

Los resultados de la Tabla 9 muestran que el bioplástico optimizado presenta niveles de metales pesados por debajo de los límites de cuantificación, lo que indica una presencia mínima o no detectable de estos elementos en la matriz final. Únicamente el flúor registró un valor cuantificable, evidencia de que el material obtenido posee una carga contaminante muy baja y adecuada para aplicaciones seguras.

El bioplástico optimizado presentó un 78.93 % de sólidos volátiles, lo que indica su alta composición orgánica y su potencial de biodegradabilidad. Sus propiedades mecánicas mostraron una resistencia a la tracción de 2.383 MPa y una elongación del 10.96 %, destacando su capacidad para soportar esfuerzos y su flexibilidad, aspectos clave para su aplicación en materiales sostenibles.

Tabla 5. Contenido de grupos metoxilo, grado de esterificación y ácido anhidrouónico de la pectina extraída

Propiedad funcional	Resultado (%)
Grupos metoxilos	11.17 ± 0.046
Grado de esterificación	88.74 ± 0.075
Ácido anhidrouónico	69.89 ± 0.056

La degradación del bioplástico (Figura 5) mostró una reducción continua de su tamaño a lo largo de 90 días. A los 15 días, el material perdió aproximadamente el 30 % de su área, con ligera adhesión de compost (pH 8.32; acidez 0.09). Para el día 30, la degradación alcanzó el 60 %, y se pudieron observar decoloración y fracturas. A los 60 días persistían solo pequeños fragmentos (90 % de pérdida). Finalmente, al día 90, el bioplástico se desintegró por completo (pH 8.22; acidez 0.105), evidencia de una alta biodegradabilidad bajo condiciones de compostaje.

Tabla 6. Espesor y peso del bioplástico en función de las concentraciones de pectina y glicerina

Pectina (%)	Glicerina (%)	Espesor (mm)	Peso (g)
1.5	1.5	0.12 ± 0.061	0.55 ± 0.070
1.5	3.0	0.17 ± 0.069	0.83 ± 0.092
1.5	4.5	0.12 ± 0.066	0.77 ± 0.075
3.0	1.5	0.09 ± 0.061	0.48 ± 0.060
3.0	3.0	0.15 ± 0.070	0.53 ± 0.061
3.0	4.5	0.11 ± 0.068	0.57 ± 0.080
4.5	1.5	0.09 ± 0.060	0.32 ± 0.082
4.5	3.0	0.11 ± 0.044	0.35 ± 0.066
4.5	4.5	0.08 ± 0.070	0.46 ± 0.060

Discusión

El análisis microbiológico de la cáscara de manzana evidenció niveles reducidos de coliformes (< 3 UFC/g), aerobios mesófilos (< 10 UFC/g) y mohos (< 10 UFC/g), valores compatibles con materias primas de buena calidad higiénica y dentro de los límites establecidos por la NTS 071-2008 (Ministerio de Salud del Perú, 2008). Además, son consistentes con los reportados por Li y Liu (2019), Degaga *et al.* (2022) y Bano *et al.* (2023), quienes indican que una baja carga microbiana favorece la estabilidad de las matrices vegetales destinadas a procesos de extracción.

La extracción de la pectina alcanzó un rendimiento máximo de 38.90 % bajo 85 °C, pH 1, dilución 1:30 y 45 min. El análisis ANOVA evidenció efectos significativos de temperatura, pH y dilución. La mayor eficiencia se atribuye a la despolimerización controlada de la protopectina en condiciones de elevada acidez y aporte térmico, mecanismo descrito por Nopiani *et al.* (2024) y Sayed *et al.* (2022). Los valores reportados por Aldemir *et al.* (2024) y Rahman *et al.* (2023) (11.28 % y 5.06 %) resultaron inferiores, lo que refleja la ventaja de optimizar simultáneamente diversos factores operacionales. La variabilidad entre estudios también responde a diferencias en las condiciones ambientales del cultivo, composición del fruto y madurez, factores señalados por Lu *et al.* (2023) como determinantes en la cantidad y calidad de la pectina.

Tabla 7. ANOVA del modelo cuadrático y lineal para el espesor y peso del bioplástico

Tratamientos	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor p
Espesor - Modelo cuadrático					
Modelo	0.0117	5	0.0023	16.54	< 0.0001
A-Glicerina	0.0001	1	0.0001	0.5281	0.4813
B-Pectina	0.0044	1	0.0044	31.04	0.0001
A*B	0.0000	1	0.0000	0.0880	0.7718
A ²	0.0072	1	0.0072	50.88	< 0.0001
B ²	0.0000	1	0.0000	0.1760	0.6822
Residual	0.0017	12	0.0001		
Error	0.0008	9	0.0001		
Corridas	0.0135	17			
Peso - Modelo lineal					
Modelo	0.4163	3	0.1388	37.49	< 0.0001
A-Glicerina	0.0687	1	0.0687	18.56	0.0007
B-Pectina	0.3444	1	0.3444	93.05	< 0.0001
A*B	0.0032	1	0.0032	0.8538	0.3711
Residual	0.0518	14	0.0037		
Error	0.0043	9	0.0005		
Corridas	0.4681	17			

(*) Significativo; (NS) no significativo; (gl) grados de libertad; (ANOVA) análisis de varianza; nivel de significancia $p < 0.05$.

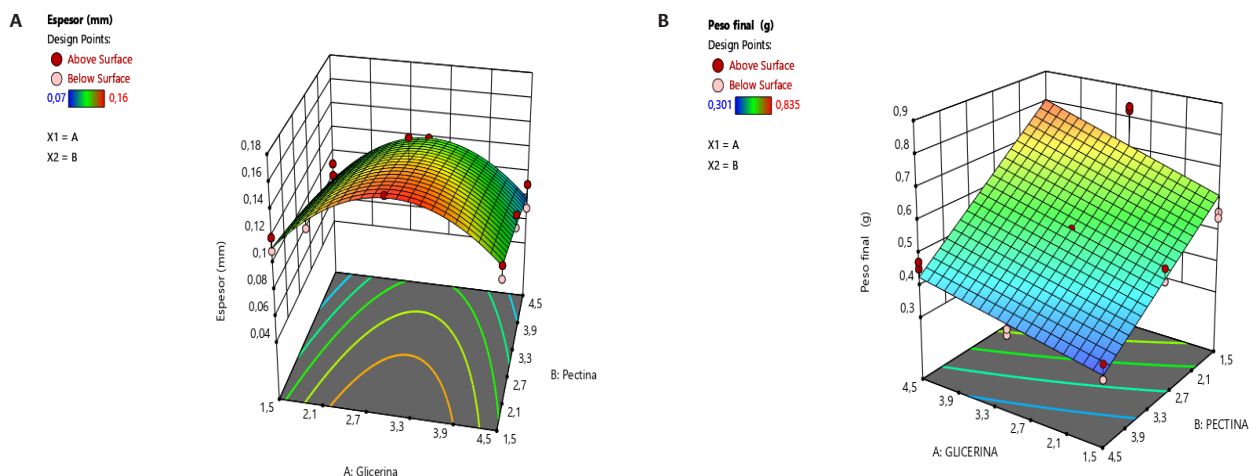


Figura 3. Superficie respuesta del efecto del % de glicerina y % de pectina sobre el espesor y peso del bioplástico.
Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Señales FTIR-ATR de los grupos estructurales presentes en el bioplástico optimizado

Grupo funcional	Rango teórico (cm ⁻¹)	Resultado experimental (cm ⁻¹)
-OH	3200 – 3650	3300
-CH/-CH ₂	2850 – 2950	2927
-C=O	1650 – 1750	1744
-COO ⁻	1600 – 1690	1644
-C-O-	990 – 1200	1013

*Rangos tomados de Mabborang *et al.* (2021) y Mecozzi *et al.* (2012).

Los espectros FTIR confirmaron la presencia de los grupos estructurales característicos de la pectina, hidroxilos (3307 cm⁻¹), carbonilos (1730 cm⁻¹), carboxilatos (1622 cm⁻¹), enlaces C-O (1051 cm⁻¹) y señales alquílicas (2944 cm⁻¹). Estos grupos funcionales desempeñan acciones específicas, los -OH aportan solubilidad y capacidad de interacción intermolecular (Kleckner y Nair, 2017), los carbonilos (-C=O) favorecen la formación de redes gelificadas (Mahmoudi *et al.*, 2024) y los carboxilatos (-COO⁻) contribuyen a la estabilidad electrostática y a la reticulación (Said *et al.*, 2023). La pectina obtenida presentó 11.17 % de metoxilos, 88.74 % de esterificación y 69.89 % de ácido anhidrouónico, valores que indican una pectina de alto metoxilo con elevada pureza y adecuada capacidad gelificante, comparativamente superior a la reportada por Aldemir *et al.* (2024) y Rahman *et al.* (2023). Estos parámetros favorecen su uso en matrices estructurales de bioplásticos por su estabilidad y cohesión (Cui *et al.*, 2023; Gawkowska *et al.*, 2018).

Las formulaciones con 3 % de glicerina y 1.5 % de pectina produjeron el mayor espesor (0.17 mm) y peso (0.83 g). La glicerina actúa como plastificante mediante la reducción de las fuerzas intermoleculares,

reconfigurando la red polimérica y generando películas más flexibles y gruesas, conforme al mecanismo descrito por Tarique *et al.* (2021). Al Fath *et al.* (2024) y Chodijah *et al.* (2019) advierten que niveles excesivos producen pérdida de estabilidad mecánica, por lo que la relación pectina-glicerina determina la integridad estructural de la película. Estudios como los de Gurram *et al.* (2018), con espesores de hasta 1.03 mm, y Chodijah *et al.* (2019), con valores de 0.0311-0.0387 mm, muestran variaciones atribuibles a la naturaleza de los polisacáridos, la concentración del plastificante y las condiciones de secado.

Los grupos estructurales detectados en el bioplástico (-OH, -C=O, -COO⁻, -CH/CH₂ y C-O-) concuerdan con los reportes de Li, J. *et al.* (2022) y Chodijah *et al.* (2019), quienes destacan su relevancia en las propiedades de elasticidad, cohesión y estabilidad estructural. Las concentraciones de metales pesados permanecieron por debajo de los límites de cuantificación, mientras que el flúor alcanzó 0.10 mg/kg. Markowicz y Szymańska-Pulikowska (2019) vinculan la presencia de estos elementos a residuos del procesamiento, limpieza de equipos o contaminación durante la manipulación. Acosta-Coley *et al.* (2019) y Turner y Filella (2021) documentaron niveles igualmente bajos en biopolímeros, compatibles con estándares europeos para materiales biodegradables. El contenido de sólidos volátiles (78.93 %) indica una alta proporción de compuestos orgánicos y capacidad de degradación térmica dentro de los rangos de 79-95 %, descritos por Nachod *et al.* (2021), y por debajo del 94.5 %, reportado por Álvarez-Betancourt *et al.* (2021). Según Paolin y Strlič (2024) y Kiland *et al.* (2025), este parámetro constituye un indicador clave para evaluar la estabilidad térmica y el potencial de biodegradación de materiales poliméricos.

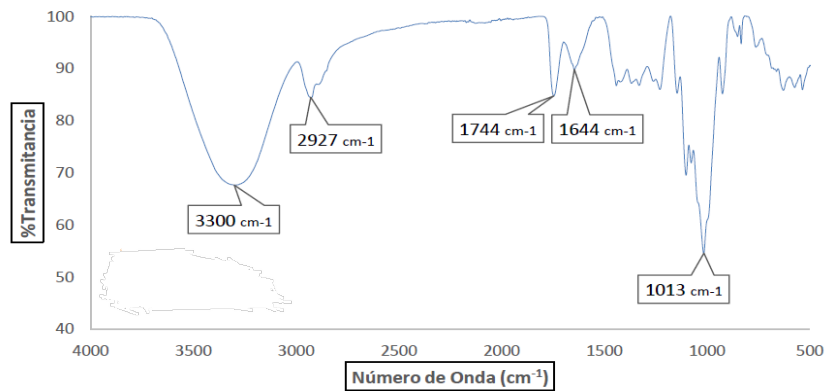


Figura 4. Espectros FTIR-ATR del bioplástico.
Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Concentración de metales pesados y flúor en el bioplástico optimizado

Metal pesado	LCM	Resultados (mg/Kg)
Arsénico	2.67	< 2.67
Cadmio	0.33	< 0.33
Cromo	1.33	< 1.33
Plomo	3.33	< 3.33
Mercurio	0.50	< 0.50
Selenio	0.50	< 0.50
Cobre	1.00	< 1.00
Níquel	1.67	< 1.67
Molibdeno	1.00	< 1.00
Zinc	0.67	< 0.67
Flúor	0.10	0.10

LCM: Límite de cuantificación de método.

Tabla 9. Propiedades mecánicas del bioplástico optimizado

Prueba	Resultado
Resistencia a la tracción	2.383 ± 0.166 Mpa
Elongación	10.96 ± 0.761 %

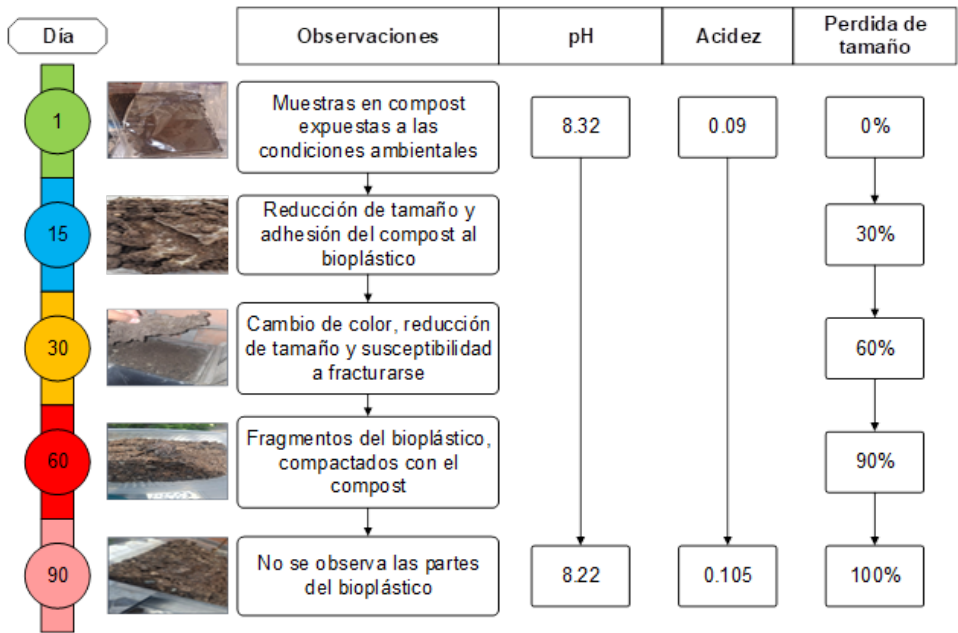


Figura 5. Biodegradación del bioplástico durante 90 días: pérdida de tamaño, pH y acidez.
Fuente: elaboración propia

Las propiedades mecánicas mostraron una resistencia a la tracción de 2.383 MPa y elongación de 10.96 %, valores que reflejan un equilibrio moderado entre rigidez y flexibilidad. Los resultados se ubican por debajo de los registrados por Al Fath *et al.* (2024) y Chodijah *et al.* (2019), diferencia atribuida a la composición del biopolímero y el nivel de plastificante. Finalmente, la degradación completa en 90 días confirma el carácter biodegradable del material. Ren *et al.* (2022) y Jara *et al.* (2023) documentaron degradaciones más rápidas (5 semanas y 21 días, respectivamente), variación influida por las condiciones del compost, humedad y pH, factores determinantes en la velocidad de descomposición.

Conclusiones

El estudio permitió establecer que la cáscara de manzana constituye una fuente adecuada para la obtención de pectina con propiedades estructurales compatibles con su incorporación en matrices biopoliméricas. De esta manera, se responde a la pregunta de investigación mediante la definición de condiciones experimentales que optimizan su extracción y calidad. Los resultados mostraron que la interacción entre pectina, glicerina y almidón determina la configuración estructural del bioplástico y sustenta las variaciones registradas en su comportamiento mecánico y en su biodegradabilidad. La ausencia de metales pesados en concentraciones cuantificables y la degradación completa en condiciones de compostaje respaldan la viabilidad del material para aplicaciones sostenibles y eventualmente para contacto alimentario. Sin embargo, la naturaleza a escala de laboratorio y la evaluación en un único escenario de degradación constituyen limitaciones que generan la necesidad de estudios posteriores orientados a ensayos de migración, análisis en distintos ambientes, incorporación de otros polímeros y evaluaciones de escalado y ciclo de vida, con el fin de fortalecer su potencial de aplicación industrial dentro del marco de la economía circular.

Referencias

- Acosta-Coley, I.; Mendez-Cuadro, D.; Rodríguez-Cavallo, E.; de la Rosa, J. y Olivero-Verbel, J. (2019). Trace elements in microplastics in Cartagena: A hotspot for plastic pollution at the Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 139, 402-411. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.12.016>
- Al Fath, M.; Ayu, G.; Hasibuan, G.; Dalimunthe, N. y Alexander, V. (2024). The effect of glycerol and sago starch addition on the characteristics of bioplastics based on orange peel pectin. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 30(4), 359-365. <https://doi.org/10.2298/CICEQ231214007A>
- Aldemir, H.; Kamiloglu, A. y Çakır, Ö. (2024). Optimization of pectin extraction from crab apple peel and usage in a model meat emulsion system. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(5), 3827-3838. <https://doi.org/10.1007/S11694-024-02458-1>
- Álvarez-Betancourt, P. A.; Luna-Pabello, V. M.; Ussa-Garzón, J. E. y Maciel-Cerda, A. (2021). Biodegradability of a bioplastic film from tamarind xyloglucan in composting bioreactors. *DYNA*, 88(218), 143-151. <https://doi.org/10.15446/DYNA.V88N218.90468>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). *Standard practice for general techniques for obtaining infrared spectra for qualitative analysis* (Vol. 03.06.).
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2023). *Standard specification for labeling of plastics designed to be aerobically composted in municipal or industrial facilities* (Vol. 08.03.).
- Association of Official Analytical Chemistry (AOAC). (2002). *Official methods of analysis of AOAC International* (16.^a ed.). Washington DC.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2016). *Official Methods of Analysis of International* (20.^a ed.). Washington DC
- Bano, A.; Gupta, A.; Prusty, M. R. y Kumar, M. (2023). Elicitation of fruit fungi infection and its protective response to improve the postharvest quality of fruits. *Stresses*, 3(1), 231-255. <https://doi.org/10.3390/STRESSES3010018>
- Bedoya-Perales, N. S. y Dal' Magro, G. P. (2021). Quantification of food losses and waste in Peru: A mass flow analysis along the food supply chain. *Sustainability*, 13(5), 2807. <https://doi.org/10.3390/SU13052807>
- Chodijah, S.; Husaini, A.; Zaman, M. y Hilwatulisan. (2019). Extraction of pectin from banana peels (*Musa paradisiaca fomatypica*) for biodegradable plastic films. *Journal of Physics: Conference Series*, 1167(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1167/1/012061>
- Cordova-Buiza, F.; Paucar-Cáceres, A.; Quispe-Prieto, S. C.; Rivera-Garré, A. P.; Huerta-Tantaleán, L. N.; Valle-Paucar, J.; De León-Panduro, C. y Burrowes-Cromwell, T. (2022). Strengthening collaborative food waste prevention in Peru: Towards responsible consumption and production. *Sustainability*, 14(3), 1050. <https://doi.org/10.3390/SU14031050>
- Cui, Y.; Chen, J. y Zhang, S. (2023). The effect of degree of esterification of pectin on the interaction between pectin and wheat gluten protein. *Food Hydrocolloids*, 136, 108272. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.108272>
- David Todd, E. C. y Faour-Klingbeil, D. (2024). Impact of food waste on society, specifically at retail and foodservice levels in developed and developing countries. *Foods* 2024, 13(13), 2098. <https://doi.org/10.3390/FOODS13132098>
- Degaga, B.; Sebsibe, I.; Belete, T. y Asmamaw, A. (2022). Microbial quality and safety of raw vegetables of fiche town, Oromia, Ethiopia. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022(1), 2556858. <https://doi.org/10.1155/2022/2556858>
- Eti, S. A.; Islam, M. S.; Shourove, J. H.; Saha, B.; Ray, S. K.; Sultana, S.; Ali Shaikh, M. A. y Rahman, M. M. (2023). Assessment of heavy metals migrated from food contact plastic packaging: Bangladesh perspective. *Heliyon*, 9(9), e19667. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E19667>
- Faizan, M.; Nadeem, H.; Arif, A. y Zaheer, W. (2021). Bioplastics from biopolymers: An eco-friendly and sustainable solution of plastic pollution. *Polymer Science, Series C*, 63(1), 47-63. <https://doi.org/10.1134/S1811238221010057>
- Gawkowska, D.; Cybulska, J. y Zdunek, A. (2018). Structure-Related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers*, 10(7), 762. <https://doi.org/10.3390/POLYM10070762>
- Gurram, R.; Souza Filho, P. F.; Taherzadeh, M. J. y Zamani, A. (2018). A solvent-free approach for production of films

- from pectin and fungal biomass. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(11), 4282-4292. <https://doi.org/10.1007/S10924-018-1300-X>
- International Organization for Standardization (ISO). (1987). *Iron ores – Determination of fluorine content - Ion-selective electrode method (ISO 4694:1987)* (1st ed.).
- Jara Ramírez, V. N.; Ocaña Gonzales, Z. I.; Lizarzaburu-Aguinaga, D.; Muñoz Ccuro, F.; Román Pérez, H. y Benites-Alfaro, E. (2023). Circular economy: Use of fruit waste to obtain bioplastics. *Chemical Engineering Transactions*, 100, 103-108. <https://doi.org/10.3303/CET23100018>
- Kiland, K. J.; Martins, L.; Borden, S. A.; Lam, S. y Myers, R. (2025). Stability of volatile organic compounds in thermal desorption tubes and in solution. *Journal of Breath Research*, 19(2), 026001. <https://doi.org/10.1088/1752-7163/ADA05C>
- Klecker, C. y Nair, L. S. (2017). Matrix chemistry controlling stem cell behavior. En A. Vishwakarma y J. Karp (eds.), *Biology and Engineering of Stem Cell Niches* (pp. 195-213). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802734-9.00013-5>
- Li, D. y Liu, S. (2019). Water quality monitoring in aquaculture. En D. Li y S. Liu, *Water quality monitoring and management* (pp. 303-328). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811330-1.00012-0>
- Li, H.; Zhou, M.; Mohammed, A. E.; Chen, L. y Zhou, C. (2022). From fruit and vegetable waste to degradable bioplastic films and advanced materials: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100859. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100859>
- Li, J.; Yang, Z.; Ding, T.; Song, Y. J.; Li, H. C.; Li, D.; Chen, S. y Xu, F. (2022). The role of surface functional groups of pectin and pectin-based materials on the adsorption of heavy metal ions and dyes. *Carbohydrate Polymers*, 276, 118789. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2021.118789>
- Listyarini, R. V.; Susilawati, P. R.; Nukung, E. N. y Yua, M. A. (2020). Bioplastic from pectin of dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peel. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 23(6), 203-208. <https://doi.org/10.14710/JKSA.23.6.203-208>
- Lu, X.; Zhao, C.; Shi, H.; Liao, Y.; Xu, F.; Du, H.; Xiao, H. y Zheng, J. (2023). Nutrients and bioactives in citrus fruits: Different citrus varieties, fruit parts, and growth stages. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(14), 2018-2041. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1969891>
- Mabborang, C. M.; Padrido, J. N.; Quiachon, G. M. y de Yro, P. A. (2021). Synthesis and characterization of electrospun carbon quantum dots – polyacrylonitrile/polycaprolactone composite nanofiber membranes for Copper (II) adsorption. *Key Engineering Materials*, 878, 3-8. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.878.3>
- Mahmoudi, C.; Tahraoui Douma, N.; Mahmoudi, H.; Iurciuc, C. E. y Popa, M. (2024). Hydrogels based on proteins cross-linked with carbonyl derivatives of polysaccharides, with biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(14), 7839. <https://doi.org/10.3390/IJMS25147839>
- Mamiru, D. y Gonfa, G. (2023). Extraction and characterization of pectin from watermelon rind using acetic acid. *Heliyon*, 9(2), e13525. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13525>
- Markowicz, F. y Szymańska-Pulikowska, A. (2019). Analysis of the possibility of environmental pollution by composted biodegradable and oxo-biodegradable plastics. *Geosciences*, 9(11), 460. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES9110460>
- Mecozzi, M.; Pietroletti, M.; Scarpiniti, M.; Acquistucci, R. y Conti, M. E. (2012). Monitoring of marine mucilage formation in Italian seas investigated by infrared spectroscopy and independent component analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(10), 6025-6036. <https://doi.org/10.1007/S10661-011-2400-4>
- Ministerio de Salud del Perú [Minsa]. (2008). *Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano - NTS -N° 071*.
- Mutmainna, I.; Gareso, P. L.; Suryani, S. y Tahir, D. (2025). Can agriculture and food waste be a solution to reduce environmental impact of plastic pollution? Zero-waste approach for sustainable clean environment. *Bioresource Technology*, 420, 132130. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2025.132130>
- Nachod, B.; Keller, E.; Hassanein, A. y Lansing, S. (2021). Assessment of petroleum-based plastic and bioplastics degradation using anaerobic digestion. *Sustainability*, 13(23), 13295. <https://doi.org/10.3390/SU132313295>
- Nayanathara, T. P. y Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2024.100220>
- Ncube, L. K.; Ude, A. U.; Ogunmuyiwa, E. N.; Zulkifli, R. y Beas, I. N. (2020). Environmental impact of food packaging materials: a review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. *Materials*, 13(21), 4994. <https://doi.org/10.3390/MA13214994>
- Negrete-Bolagay, D. y Guerrero, V. H. (2024). Opportunities and challenges in the application of bioplastics: Perspectives from formulation, processing, and performance. *Polymers*, 16(18), 2561. <https://doi.org/10.3390/POLYM16182561>
- Nigam, S.; Das, A. K. y Patidar, M. K. (2021). Synthesis, characterization and biodegradation of bioplastic films produced from *Parthenium hysterophorus* by incorporating a plasticizer (PEG600). *Environmental Challenges*, 5, 100280. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100280>
- Nopiani, Y.; Hamzah, F. H.; Pato, U. y Zamzani, D. M. (2024). The effect of extraction temperature on the physicochemical characteristics of pectin from banana bunch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1364(1), 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1364/1/012073>
- Paolin, E. y Strlič, M. (2024). Volatile organic compounds (VOCs) in heritage environments and their analysis: A review. *Applied Sciences*, 14(11), 4620. <https://doi.org/10.3390/APP14114620>
- Pérez, J.; Gómez, K. y Vega, L. (2022). Optimization and preliminary physicochemical characterization of pectin extraction from watermelon rind (*Citrullus lanatus*) with citric acid. *International Journal of Food Science*, 2022(1), 3068829. <https://doi.org/10.1155/2022/3068829>
- Rahman, M. S.; Khan, S. S.; Ahmed, M. W.; Jony, M. E.; Das, P. C. y Uddin, M. B. (2023). Extraction of pectin from Elephant Apple and Pomelo fruit peels: Valorization of fruit waste towards circular economy. *Food Chemistry Advances*, 3, 100544. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2023.100544>
- Ren, W.; Qiang, T. y Chen, L. (2022). Recyclable and biodegradable pectin-based film with high mechanical strength. *Food Hydrocolloids*, 129, 107643. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.107643>
- Rentería-Ortega, M.; Colín-Álvarez, M. de L.; Gaona-Sánchez, V. A.; Chalapud, M. C.; García-Hernández, A. B.; León-Espinosa, E. B.; Valdespino-León, M.; Serrano-Villa, F. S. y Calderón-Domínguez, G. (2023). Characterization and applications of the pectin extracted from the peel of *Passiflora tripartita* var. mollissima. *Membranes*, 13(9), 797. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES13090797>

- Said, N. S.; Fola Olawuyi, I. y Lee, W. Y. (2023). Pectin hydrogels: Gel-Forming behaviors, mechanisms, and food applications. *Gels*, 9(9), 732. <https://doi.org/10.3390/GELS9090732>
- Sayed, M. A.; Kumar, J.; Rahman, M. R.; Noor, F. y Alam, M. A. (2022). Effect of extraction parameters on the yield and quality of pectin from mango (*Mangifera indica* L.) peels. *Discover Food*, 2, 1-17. <https://doi.org/10.1007/S44187-022-00029-1>
- Syarifuddin, A.; Muflih, M. H.; Izzah, N.; Fadillah, U.; Ainani, A. F. y Dirpan, A. (2025). Pectin-based edible films and coatings: From extraction to application on food packaging towards circular economy. A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 9, 100680. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2025.100680>
- Tarique, J.; Sapuan, S. M. y Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11, 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
- Turner, A. y Filella, M. (2021). Hazardous metal additives in plastics and their environmental impacts. *Environment International*, 156, 106622. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2021.106622>
- Wahyuningtiyas, N. E. y Suryanto, H. (2017). Analysis of biodegradation of bioplastics made of cassava starch. *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*, 1(1), 24-31. <https://doi.org/10.17977/UM016V1I12017P024>
- Williams, A. T. y Rangel-Buitrago, N. (2022). The past, present, and future of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 176, 113429. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113429>
- Zhang, S.; Fu, Q.; Li, H.; Wu, P.; Waterhouse, G.; Li, Y. y Ai, S. (2023). A pectocellulosic bioplastic from fruit processing waste: robust, biodegradable, and recyclable. *Chemical Engineering Journal*, 463, 142452. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.142452>
- Zimmermann, L.; Dombrowski, A.; Völker, C. y Wagner, M. (2020). Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition. *Environment International*, 145, 106066. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.106066>