ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.540

# Effect of glycerol concentration on the mechanical and physical properties of a bioplastic from coffee (*Coffea arabica*) husk

Edgardo Poemape-Hora[1], Claudia Zelada-Santillan[1], Javier Luna Victoria-Amasifuen[1], Carlos Pongo-Medina[1], Diego Silva-Chuquipoma[1]
[1] Universidad Privada del Norte, Peru, *N00249281@upn.pe, N00267365@upn.pe, N00293831@upn.pe, N00278429@upn.pe, diego.silva@upn.pe*

***Abstract*– The study developed and characterized a biodegradable bioplastic from coffee husks, taking advantage of this agroindustrial waste as raw material for a sustainable alternative to conventional plastics. Through a pre-experimental design, bioplastics were formulated with different concentrations of glycerol, combined with cellulose extracted from the husk, cassava starch, acetic acid and distilled water. The bioplastic was made using the casting method and mechanical properties such as tensile strength and elongation were evaluated, as well as physical properties such as thickness and moisture content. Formulation T1 stood out with better performance, achieving a maximum resistance of 2.03 ± 0.3 kg and an average thickness of 0.33 ± 0.005 mm. Statistical analyzes confirmed significant differences between the formulations, indicating that the glycerol concentration directly affects the characteristics of the bioplastic. The results showed that the material is biodegradable, reinforces the circular economy and constitutes a viable solution to reduce the environmental impacts of petroleum-derived plastics.***

***Keywords*—bioplastics, coffee husk, agroindustrial waste, mechanical properties, glycerol.**

# Efecto de la concentración de glicerol en las propiedades mecánicas y físicas de un bioplástico a partir de cascarilla de café (*Coffea arabica*)

Edgardo Poemape-Hora[1], Claudia Zelada-Santillan[1], Javier Luna Victoria-Amasifuen[1], Carlos Pongo-Medina[1], Diego Silva-Chuquipoma[1]
[1] Universidad Privada del Norte, Perú, *N00249281@upn.pe, N00267365@upn.pe, N00293831@upn.pe, N00278429@upn.pe, diego.silva@upn.pe*

***Resumen*– El estudio desarrolló y caracterizó un bioplástico biodegradable a partir de cascarilla de café, aprovechando este residuo agroindustrial como materia prima para una alternativa sostenible a los plásticos convencionales. Mediante un diseño preexperimental, se formularon bioplásticos con diferentes concentraciones de glicerol, combinadas con celulosa extraída de la cascarilla, fécula de yuca, ácido acético y agua destilada. El bioplástico se elaboró utilizando el método casting y se evaluaron propiedades mecánicas como resistencia a la tracción y elongación, además de propiedades físicas como espesor y contenido de humedad. La formulación con 0.5 gramos de glicerol destacó con un mejor desempeño, logrando una resistencia máxima de 2.03 ± 0.3 kg y un espesor promedio de 0.33 ± 0.005 mm. Los análisis estadísticos confirmaron diferencias significativas entre las formulaciones, indicando que la concentración de glicerol afecta directamente las características del bioplástico. Los resultados demostraron que el material es biodegradable, refuerza la economía circular y constituye una solución viable para reducir los impactos ambientales de los plásticos derivados del petróleo.***

***Palabras clave*—Bioplásticos, cascarilla de café, residuos agroindustriales, propiedades mecánicas, glicerol**

## I. Introducción

. El plástico se ha convertido en un material imprescindible en la vida cotidiana de la ciudadanía moderna por sus múltiples ventajas, como su versatilidad, resistencia, impermeabilidad y facilidad de manejo. Estas propiedades han permitido formar parte de una amplia gama de productos como envases, botellas, bolsas, cepillos, suministros médicos, materiales de construcción y componentes de máquinas [1].

Sin embargo, parece que no se preveían los efectos negativos de su inadecuada gestión, que han contribuido a la contaminación ambiental. Adicionalmente, la producción masiva de plástico ha afectado seriamente a la naturaleza, en vista de que es un material que tarda mucho en descomponerse y muchas personas no lo almacenan correctamente para su reciclaje, por tanto, es muy importante implementar medidas efectivas para reducir el medio ambiente impacto causado por este material.

En este contexto, se ha convertido en una prioridad encontrar alternativas más sostenibles como bioplásticos para reducir el impacto ambiental de los residuos plásticos. Al mismo tiempo, la industria del café genera cantidades importantes de residuos orgánicos, especialmente los caparazones de café, que a menudo se desperdician o se gestionan de manera ineficiente, creando más inconvenientes ambientales. Los caparazones de café, ricos en materia orgánica, ofrecen una oportunidad única para el desarrollo de bioplásticos, ofreciendo una solución dual que aborda tanto la gestión de residuos plásticos como los residuos agroindustriales.

La generación de residuos de café ha experimentado un incremento en los últimos cinco años, correlacionado con el aumento en la producción y consumo mundial de café. Según datos de la Organización Internacional del Café (OIC), la producción mundial de café en el año cafetero 2021/2022 alcanzó aproximadamente 170,3 millones de sacos de 60 kilogramos [2]. Considerando que solo el 5% del fruto del café es aprovechado en su preparación y el 95% restante se convierte en residuos [3], se estima que la cantidad de residuos generados es significativa.

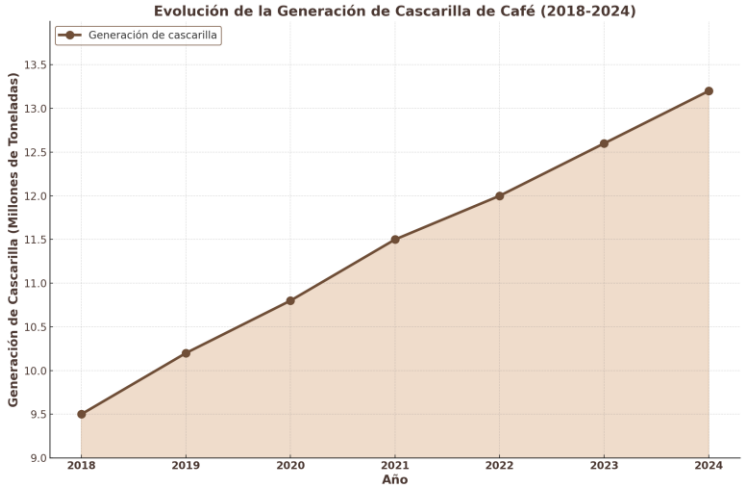


Fig. 1 Datos estimados basados en tendencias de producción mundial de café

Esta gráfica muestra una tendencia creciente en la producción de café, lo que sugiere un aumento paralelo en la generación de residuos de café a nivel mundial. Es importante destacar que estos residuos, si no se gestionan adecuadamente, pueden representar un desafío ambiental significativo. Sin embargo, iniciativas recientes han explorado usos sostenibles para estos desechos. Por ejemplo, investigadores australianos han descubierto que los pozos de café pueden incorporarse al hormigón, aumentando su resistencia en un 30% y reduciendo la cantidad de residuos que terminan en vertederos [4].

Diversas investigaciones han explorado la elaboración de bioplásticos a partir de residuos agroindustriales, destacando

el uso de cascarillas de café por sus propiedades mecánicas y sostenibilidad. [5] elaboraron bioplásticos utilizando almidón extraído de cáscara de patata (*Solanum tuberosum*) y cáscara de papaya (*Carica papaya* L.), con un tratamiento óptimo que logró un rendimiento del 5.421 %. Los bioplásticos resultantes, preparados mediante un diseño factorial, mostraron un 46.6 % de elongación, un espesor de 0.21 mm, una solubilidad del 43.943 % y una biodegradabilidad de 29.743 % en compost y 26.502 % en el medio ambiente tras 15 días. [6] empleó cáscaras de maracuyá y glicerina como plastificante, donde el aumento de glicerina (>25 %) comprometió la resistencia a la tracción, aunque redujo la absorción de agua. Bioplásticos 100 % de maracuyá presentaron mayor resistencia mecánica, y con una biodegradabilidad del 93 % en 43 días de compostaje (UNE-EN 13432:2001). Asimismo, [7] desarrollaron bioplásticos a base de fécula de banano ajustando la resistencia y espesor según la proporción de glicerina, vinagre y almidón, mostrando una biodegradación más rápida en agua que en condiciones ambientales, ideal para aplicaciones compostables y sostenibles; [8] desarrollaron envases compostables y películas biodegradables utilizando subproductos de la industria cafetalera, logrando una resistencia a la tracción de 14.2 MPa y una elongación al rompimiento de 12.8 %, empleando métodos como extrusión y moldeo por compresión. Por su parte, [9] demostraron que la fermentación sólida de residuos como la cascarilla permite producir polímeros biodegradables, como polihidroxialcanoatos (PHA), con un rendimiento de hasta 1.5 g/L de PHA, logrando propiedades mecánicas similares a plásticos convencionales. En otro estudio, [10] evaluaron partículas lignocelulósicas de cascarilla en compuestos de polihidroxibutirato (PHB), observando un aumento del 20 % en la resistencia a la tracción (de 10 MPa a 12 MPa) y una mejora en la estabilidad térmica al incorporar un 20 % de estos residuos. Asimismo, [11] investigaron el refuerzo de polietileno de baja densidad con cascarillas de café, reportando un incremento del módulo de tracción de 120 MPa a 150 MPa, junto con una reducción del 15 % en la densidad del material compuesto. Finalmente, [12] analizaron la valorización de residuos sólidos como las cascarillas en bioprocesos, observando que estos pueden ser transformados en bioplásticos con propiedades mecánicas comparables a los plásticos derivados del petróleo, alcanzando resistencias a la tracción de hasta 15 MPa en aplicaciones específicas.

Por otro lado, se ha explorado el uso de glicerol como plastificante para mejorar las propiedades mecánicas y biodegradables de bioplásticos derivados de residuos agroindustriales. [13] utilizaron glicerol obtenido de residuos industriales en la fabricación de bioplásticos a partir de almidón de plátano. Descubrieron que el glicerol influye directamente en la resistencia a la tracción, alcanzando un máximo de 3.43 MPa al emplear una concentración de almidón al 7 % (p/v), 1 ml de glicerol y una temperatura de gelatinización de 80 °C. Similarmente, [14] estudiaron bioplásticos derivados de celulosa de residuos de carragenina, evaluando el efecto de diferentes concentraciones de glicerol (1-7 % v/v). Observaron que un 5 % de glicerol ofrecía un equilibrio óptimo entre biodegradabilidad (39.20 % de degradación en 7 días) y propiedades mecánicas adecuadas. En otro estudio, [15] empleó glicerol crudo purificado mediante destilación para sintetizar bioplásticos a partir de 1,3-propanodiol. Este bioplástico demostró una resistencia a la tracción de 4.3 N y una elongación de 104 mm antes de romperse, resultados prometedores para aplicaciones de envasado biodegradable. Además, [16] investigaron bioplásticos basados en proteínas de soya, donde el glicerol se comparó con otros polialcoholes como plastificante. Encontraron que los bioplásticos con glicerol presentaban un módulo de Young de 60 MPa y propiedades térmicas superiores debido a su menor volatilidad en comparación con otros plastificantes. Finalmente, [17] purificaron glicerol crudo obtenido de la producción de biodiésel, logrando bioplásticos con resistencia a la tracción de hasta 4.1 N, según el método de purificación utilizado.

La utilización de cascarilla de café para la elaboración de bioplásticos no solo promueve la economía circular, sino que también ofrece una solución sostenible a los plásticos comunes. El gran volumen de residuos de café generados a nivel mundial, estimado en más de dos millones de toneladas anuales, resalta la importancia de desarrollar estrategias eficaces de gestión de residuos dentro de la industria del café [18]. Este enfoque contribuye a la reducción de residuos agrícolas y a la disminución de la dependencia de recursos no renovables como el petróleo. Además, los bioplásticos derivados de la cáscara de café podrían presentar propiedades biodegradables y compostables, alineándose con las tendencias actuales hacia materiales más amigables con el medio ambiente. Dado el volumen significativo de residuos de cáscara de café generado anualmente, esta iniciativa no solo tiene el potencial de mitigar problemas ambientales, sino también de agregar valor económico a la industria cafetera mediante la creación de productos con valor añadido.

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del glicerol y la determinación del porcentaje adecuado para obtener un bioplástico a base de cascarilla de café con las mejores propiedades mecánicas posibles, así como la extracción de la celulosa de la cascarilla de café.

## II. Materiales y Métodos

El estudio fue de tipo experimental, con un enfoque cuantitativo, que tuvo como propósito medir las propiedades mecánicas de un bioplástico elaborado a partir de cascarilla de café. El diseño fue experimental, debido a que se manipularon distintas concentraciones de glicerol en un entorno controlado para observar los efectos sobre las características mecánicas y físicas del biopolímero resultante.

### *A. Extracción de celulosa de cascarilla de café*

Se extrajo la celulosa de la cascarilla de café en el laboratorio de producción de la Universidad Privada del Norte,

siguiendo el protocolo de [19], con algunas modificaciones, tal y como se detalla en la Figura 2.

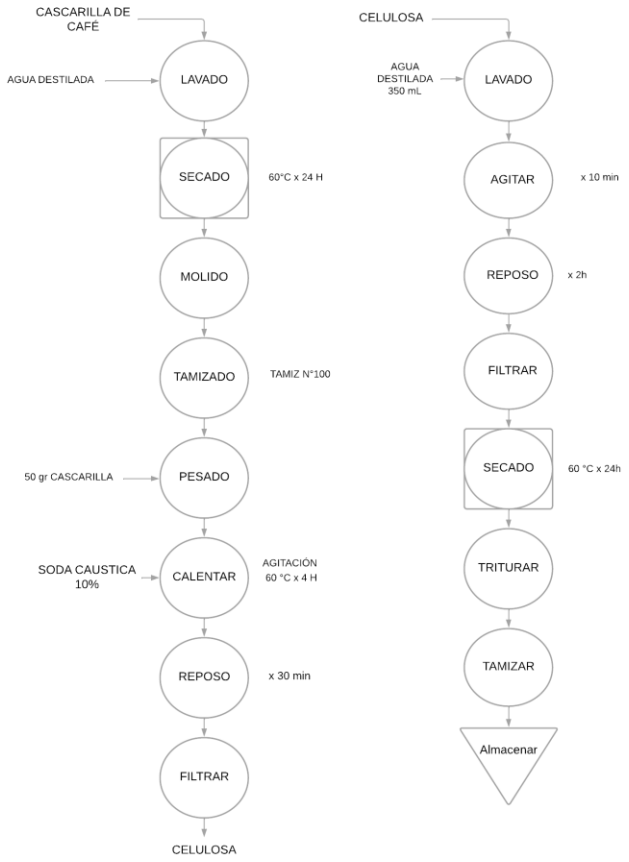


Fig. 2 Diseño experimental de la extracción de celulosa.

## B. *Formulación para la elaboración del bioplástico*

TABLA I
Formulaciones para elaboración de bioplástico

| Tratamiento | Celulosa (g) | Fécula de yuca (g) | Glicerol (g) | Ácido Acético (g) | Agua destilada (g) |
|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 0.5 | 2 | 0.5 | 3 | 30 |
| **T2** | 0.5 | 2 | 1 | 3 | 35 |
| **T3** | 0.5 | 2 | 1.5 | 3 | 40 |

## C. *Elaboración del bioplástico*

Se llevó a cabo la elaboración del bioplástico por el método casting siguiendo el procedimiento de [20], tal cual el procedimiento se observa en la Figura 3.

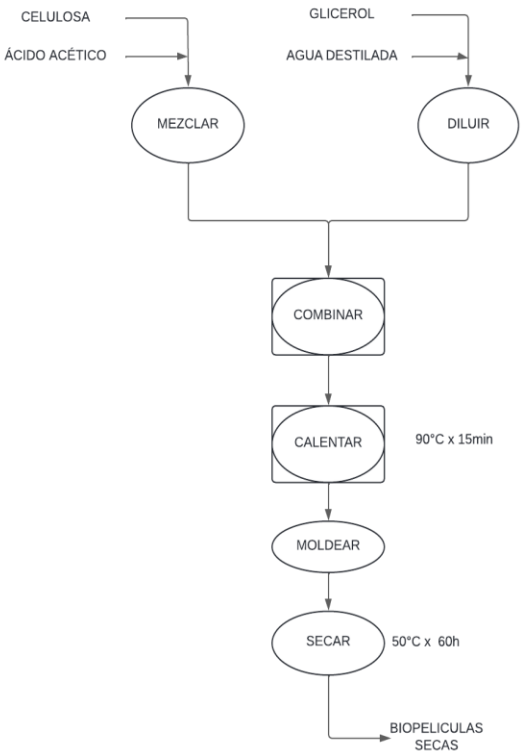


Fig. 3 Diseño experimental de la elaboración de bio plásticos.

## D. *Determinación de propiedades mecánicas*

Para determinar las propiedades mecánicas del bioplástico se llevaron a cabo varios ensayos. Primero, se evaluó la resistencia a la tracción y elongación utilizando un texturómetro (TA.HD plus), que mide la fuerza necesaria para romper una muestra y cuánto se puede estirar antes de que se rompa, utilizando una velocidad de 100 mm/min en una celda de 100 kgf a una distancia de separación de 30 mm y con un tamaño de muestra de 6 cm x 1.5 cm. Los resultados se expresaron en kilogramos (kg).

## E. *Determinación de propiedades físicas*

Para la medición del espesor, se empleó un vernier digital (Lutron DC – 515), realizando mediciones en varios puntos de cada muestra y obteniendo un promedio del espesor en milímetros. En cuanto al porcentaje de humedad de las muestras fue determinado mediante un analizador de humedad (Ohaus – OH-0201), siguiendo el procedimiento estándar.

## F. *Análisis Estadístico*

Los datos recolectados serán sometidos a un análisis estadístico descriptivo, comparando los valores obtenidos en las diferentes formulaciones. Se calcularán promedios y desviaciones estándar, y se aplicará un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95% (significancia del 0.05), con el programa estadístico IBM SPSS Statistics,

para evaluar si existen diferencias entre las formulaciones en cuanto a sus propiedades mecánicas y físicas.

En cuanto a los aspectos éticos, la investigación se ajustó a las normativas que rigen la práctica científica, promoviendo la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de residuos agroindustriales, en este caso, la cascarilla de café. No se utilizó material que pueda causar daño a seres vivos, y el proyecto buscó minimizar el impacto ambiental, lo cual está alineado con el objetivo de generar alternativas sostenibles a los plásticos convencionales.

## III. Resultados y Discusiones

### *A. Propiedades Mecánicas*

Los resultados mostraron fuerzas de tracción máximas promedio de 2.03 ± 0.3 kg (T1), 0.3 ± 0.05 kg (T2) y 0.14 ± 0.01 kg (T3). Estos valores son consistentes con lo reportado por [21] quienes estudiaron bioplásticos de celulosa y detectaron que la resistencia a la tracción varía entre 0.17 N y 2.23 N según la concentración de celulosa en las formulaciones. Esto indica que el tipo de tratamiento y las condiciones experimentales pueden modular significativamente la resistencia del material.

Por otro lado, los valores de elongación máxima obtenidos en este estudio (3 ± 0.78 mm en T1, 29.82 ± 5.65 mm en T2 y 26.85 ± 5.09 mm en T3) coinciden parcialmente con los reportes de [22], quienes señalaron que la incorporación de fibras celulósicas del café mejora la resistencia a la tracción, aunque tiende a disminuir la elasticidad del material compuesto. La alta elongación observada en T2 y T3 sugiere que estas formulaciones mantienen una flexibilidad relativa, lo que podría ser ventajoso para ciertas aplicaciones como empaques biodegradables.

Además, se ha reportado en estudios como el de [23] que fibras de celulosa de origen vegetal, como las derivadas del maíz, presentan tensiones de tracción significativamente mayores, alcanzando hasta 1478 MPa con tratamientos específicos. Sin embargo, la elongación observada en fibras de café muestra diferencias considerables, probablemente debido a su composición específica y las características estructurales únicas de la celulosa del café.

Otra referencia relevante es el trabajo de [24], quienes observaron que el tratamiento alcalino de fibras celulósicas puede incrementar sustancialmente la resistencia mecánica, mejorando la adhesión interfacial en compuestos plásticos reforzados. Similarmente, nuestro trabajo demuestra que los tratamientos aplicados afectan significativamente las propiedades de tracción y elongación, aunque se requieren investigaciones adicionales para optimizar estos procesos.

En términos comparativos, [25] reportaron que las fibras de celulosa de cascarillas de café mejoraron el módulo de elasticidad de materiales compuestos en un 186%, pero esto redujo la elongación y aumentó la rigidez. Este comportamiento sugiere un balance entre resistencia y ductilidad, que debe ser considerado en el diseño de aplicaciones prácticas.

Finalmente, investigaciones recientes como la de [26] destacan la estabilidad térmica y mecánica de materiales compuestos basados en cascarillas de café tratadas, mostrando mejoras en la tracción y flexión al aumentar la concentración de fibras hasta el 25% en la matriz.

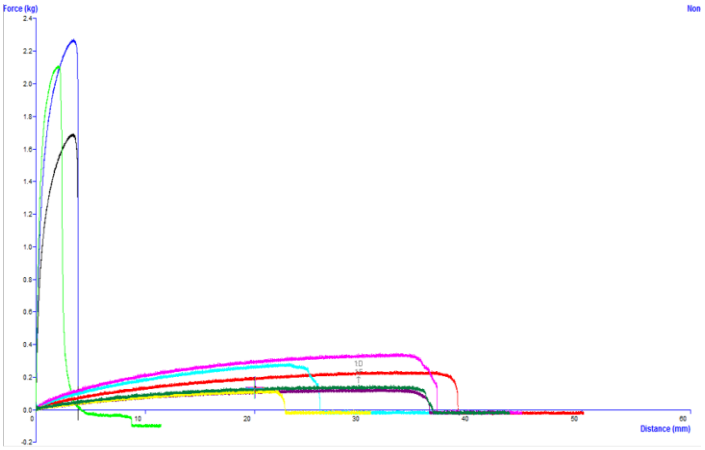


Fig. 4. Gráfico de resistencia y elongación (T1, T2, T3).

### *B. Propiedades Físicas*

Al medir el espesor de las muestras de cada tratamiento se obtuvo 0.33 ± 0.005 mm (T1), 0.28 ± 0.011 mm (T2) y 0.30 ± 0.037 mm (T3). Por otro lado, al analizar la humedad de las biopelículas se obtuvo 9.38% (T1), 13.22% (T2) y 15.16% (T3). Esto coincidió parcialmente con lo reportado por [27], quienes desarrollaron bioplásticos a partir de almidón de cáscara de patata, con espesores que alcanzaron 1.87 mm y humedades de hasta 31.22 %, dependiendo de la formulación optimizada. En otro estudio, [28] observaron espesores entre 0.21 y 0.23 mm en biopelículas de almidón oxidado, con una humedad reducida de 7.93 % a 5.36 %, demostrando que el tipo de aditivo influye significativamente en estas propiedades. Similarmente, [29] informaron un rango de espesores entre 0.16 mm y 0.29 mm en bioplásticos de almidón de maíz con contenido de agua del 13.5 % al 14.5 %, valores cercanos a los observados en T3 de este estudio. Finalmente, [30] evaluaron bioplásticos basados en carragenina y chitosán, alcanzando espesores de 0.06 mm y un contenido de humedad del 17.27 %, destacando cómo las combinaciones de materiales y plastificantes afectan las propiedades físicas. Las propiedades reportadas en este trabajo se encuentran dentro de los rangos observados en la literatura, evidenciando una buena compatibilidad de los materiales utilizados en las biopelículas.

### *C. Relación entre tratamiento y propiedades mecánicas*

Los tratamientos 2 y 3 presentan una mayor fuerza de tensión que el tratamiento 1, indicando que las modificaciones en composición o métodos de formación influyen directamente en la resistencia mecánica. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por [31], quienes observaron un incremento en la resistencia a la tensión, de 0.81 MPa a 1.33

MPa, al modificar la proporción de almidón de yuca y tannia en bioplásticos, demostrando que los ajustes en las formulaciones mejoran significativamente las propiedades mecánicas. Por su parte, [29] reportaron que bioplásticos a base de almidón de maíz reforzados con ZnO presentaron resistencias de tracción que oscilaron entre 2.744 MPa y 4.018 MPa al variar la proporción de plastificantes y aditivos. De manera similar, [27] señalaron que bioplásticos elaborados a partir de cáscaras de papa optimizados mediante diseño de superficies alcanzaron resistencias mecánicas óptimas al ajustar la relación de glicerol y sílice. Con los resultados obtenidos se analizó que las formulaciones más resistentes con las que contienen una mayor concentración de glicerol y celulosa, teniendo un comportamiento bueno en relación con la fuerza y deformación.

### *D. Análisis estadístico*

TABLA II
Resultados de Análisis de Varianza para las propiedades mecánicas y físicas

| Propiedades | Significancia (95%) |
|---|---|
| **Fuerza de tensión (kgf)** | <0.001 |
| **Elongación (mm)** | <0.001 |
| **Espesor (mm)** | 0.096 |
| **Humedad** | <0.001 |

De acuerdo con los resultados del Análisis de Varianza, se observó que la fuerza de tensión y elongación presentaron diferencias significativas entre los tratamientos; por otro lado, el espesor no mostró diferencia significativa.

TABLA III
Resultados de Prueba Tukey para las propiedades mecánicas y físicas

| Variable dependiente | (I) Tratamiento | (J) Tratamiento | Sig. |
|---|---|---|---|
| **Fuerza Tensión** | 1 | 2 | <0.001 |
| | | 3 | <0.001 |
| | 2 | 1 | <0.001 |
| | | 3 | .566 |
| | 3 | 1 | <0.001 |
| | | 2 | .566 |
| **Elongación** | 1 | 2 | <0.001 |
| | | 3 | .001 |
| | 2 | 1 | <0.001 |
| | | 3 | .702 |
| | 3 | 1 | .001 |
| | | 2 | .702 |
| **Espesor** | 1 | 2 | .084 |
| | | 3 | .319 |
| | 2 | 1 | .084 |
| | | 3 | .570 |
| | 3 | 1 | .319 |
| | | 2 | .570 |
| **Humedad** | 1 | 2 | <0.001 |
| | | 3 | <0.001 |
| | 2 | 1 | <0.001 |
| | | 3 | <0.001 |
| | 3 | 1 | <0.001 |
| | | 2 | <0.001 |

La prueba de Tukey mostró diferencias significativas en la fuerza de tensión y elongación entre los tratamientos ($p < 0.001$), siendo el tratamiento 1 el más destacado. No se encontraron diferencias significativas en el espesor, pero sí en el contenido de humedad entre los grupos ($p < 0.001$). Estos resultados resaltan la importancia de optimizar las formulaciones para lograr bioplásticos con propiedades adecuadas y sostenibles. Resultados similares fueron reportados por [30], quienes encontraron que la adición de carragenina en bioplásticos a base de quitosano afectaba significativamente la humedad (17.27 %) y la resistencia mecánica (13.72 MPa), subrayando la sensibilidad de estas propiedades a los cambios en la formulación. De manera similar, [27] reportaron diferencias estadísticamente significativas en propiedades mecánicas y contenido de humedad en bioplásticos a base de cáscaras de papa optimizados mediante diseños de superficie, con un contenido de humedad del 31.22 % en la formulación ideal. Además, [31] observaron que bioplásticos formulados con almidón de tannia y yuca también presentaron diferencias significativas en elongación y espesor, reforzando la importancia de ajustar las proporciones de los componentes para lograr propiedades óptimas.

Los resultados de fuerza de tracción máxima de los bioplásticos elaborados a partir de la celulosa de la cascarilla de café mostraron valores menores en comparación de otros bioplásticos. Por ejemplo, en el estudio de [6] que trata sobre los bioplásticos a base de la cáscara de maracuyá, se reportó una resistencia de 8.546 kg, que es significativamente superior a los 2.03 kg que se obtuvieron en el tratamiento 1 de nuestro estudio. Esto quiere decir que la matriz polimérica basada en celulosa puede tener limitaciones en términos de resistencia mecánica, aunque esta diferencia podría deberse a variaciones en los agentes plastificantes utilizados, como el glicerol.

El espesor promedio de las biopelículas de celulosa se mantuvo dentro de un rango deseable (0.28 – 0.33 mm), lo cual coincide con el objetivo de reducir costos y mejorar la comercialización que fue indicado por [19]. Sin embargo, el estudio de [5] con bioplásticos a base de almidón y cascaras de papa reportó espesores más delgados, lo que podría indicar una mayor eficiencia en la formulación de este último material. Esto resalta la necesidad de optimizar las condiciones de procesamiento para obtener biopelículas más delgadas sin comprometer su resistencia.

Los resultados de elongación indican que las formulaciones con mayor concentración de glicerol presentaron mayor deformación antes de la rotura, lo que coincide con lo reportado por [18] en bioplásticos a base de banano. Este comportamiento se atribuye al efecto plastificante del glicerol, que aumenta la flexibilidad de la matriz polimérica que podría comprometer la resistencia máxima, como se pudo observar en el estudio.

## IV. Conclusiones

El desarrollo y caracterización de bioplásticos basados en cáscara de café demostraron resultados sólidos y coherentes en términos de propiedades mecánicas, contenido de humedad y espesor. Los espesores obtenidos, 0.33 ± 0.005 mm (T1), 0.28 ± 0.011 mm (T2) y 0.30 ± 0.037 mm (T3), evidenciaron uniformidad entre los tratamientos, sin diferencias significativas entre ellos. Por otro lado, el análisis de contenido de humedad mostró diferencias importantes, con valores de 9.38 % (T1), 13.22 % (T2) y 15.16 % (T3), lo que indica que la formulación afecta directamente esta propiedad.

La incorporación de glicerol como plastificante en este estudio jugó un papel clave al mejorar la flexibilidad de los bioplásticos, permitiendo obtener materiales con una resistencia a la tensión y elongación optimizadas, como se demostró en los tratamientos 2 y 3, que presentaron diferencias significativas ($p < 0.001$) en comparación con el tratamiento 1. Esto refuerza la relevancia del glicerol en la formulación de bioplásticos para lograr propiedades mecánicas mejoradas. Los resultados subrayan la importancia de optimizar las formulaciones y los procesos de producción para obtener bioplásticos con propiedades adecuadas para aplicaciones específicas. Este enfoque puede contribuir a la fabricación de materiales biodegradables y sostenibles que respondan a las demandas actuales de reducción de contaminación ambiental. Futuros trabajos deberían explorar el impacto de factores como el tiempo de almacenamiento, la exposición a diferentes condiciones ambientales y la inclusión de nuevos aditivos para mejorar aún más el desempeño de los bioplásticos desarrollados.

## Referencias


[1] Heinrich Böll, F., 2019. Atlas del Plástico (PlasticAtlas S). Recuperado de https://sv.boell.org

[2] Organización Internacional del Café. (2022). *Annual review* 2021/2022. Recuperado de https://icocoffee.org/documents/cy2022-23/annual-review-2021-2022-c.pdf.

[3] García, D., Díaz, J., & Torres, M. (2020). Residuos de café: Aprovechamiento y sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales, 15(1)*, 93–101. https://doi.org/10.22201/rca.2020.15.1

[4] AS. (2025). Científicos descubren una nueva vida para los posos del café que puede revolucionar el planeta. *AS Actualidad.* Recuperado de https://as.com/actualidad/ciencia/cientificos-descubren-una-nueva-vida-para-los-posos-del-cafe-que-puede-revolucionar-el-planeta-n/

[5] Torres, E. (2021). Elaboración de bioplásticos a partir del almidón de la cáscara de la papa (*Solanum tuberosum*) y la cáscara de la papaya hawaina (*Carica papaya* l.) como alternativa para uso de envolturas biodegradables de alimentos. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.

[6] Escribano, V. (2020). Desarrollo y caracterización de un bioplástico a partir de cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis*). Universidad Señor de Sipán.

[7] Alcalde, E., & Huaman, F. M. (2022). Fabricación de bioplástico de Musa paradisiaca "banano" y sus propiedades tecnológicas y de biodegradación.

[8] Hernández-Varela, J. D., & Medina, A. L. (2023). Revalorization of coffee residues: Advances in the development of bioplastics from coffee husks. *Materials Science Advances, 45(2),* 345-356.

[9] Kumar, S., & Swapna, T. (2018). Coffee husk: A potential agro-industrial residue for bioplastic production through solid-state fermentation. *Journal of Applied Microbiology, 125(3),* 564-574.

[10] Reis, M. M., Pereira, D. M., & Souza, V. F. (2015). Particles of coffee wastes as reinforcement in polihidroxibutirate (PHB) composites. *Polymer Advances, 32(8),* 1234-1242.

[11] Yepes, J., Posada, E., & Rivera, F. (2017). Study of mechanical and physical properties of LLDPE-GMA composites reinforced with coffee husk particles. *Composites Science and Technology, 76(1),* 78-89.

[12] Echeverría, A., & Nuti, M. (2017). Valorisation of the residues of coffee agroindustry for bioplastics production. *International Journal of Waste Management, 65(4),* 214-221.

[13] Azaria, R., Nahar, M., Harahap, H., Kimia, D., & Fak, T. (2016). Glycerin utilization of glycerin residue as plasticizer for bioplastics making by using starch Kepok's banana weevil. *Journal of Chemical Engineering,* 5, 26-32.

[14] Fauziyah, S. N., Mubarak, A., & Pujiastuti, D. (2021). Application of glycerol on bioplastic based carrageenan waste cellulose on biodegradability and mechanical properties bioplastic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 679,* 012005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/679/1/012005

[15] Pattanasupong, A. (2017). Bioplastic sheet production from 1,3-propanediol produced by raw glycerol fermentation. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology, 17,* 958-964.

[16] Aguilar, J. M., Bengoechea, C., Pérez, E., & Guerrero, A. (2020). Effect of different polyols as plasticizers in soy-based bioplastics. *Industrial Crops and Products, 153,* 112522. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112522

[17] Michael, A., Evans, A., Wembabazi, E., Betty, N., & Nuwamanya, E. (2024). Purification of biodiesel-derived crude glycerol and its application in plasticizing cassava starch bioplastics. *Archives of Agriculture and Environmental Science, 9(3),* 12-18. https://doi.org/10.26832/24566632.2024.0903012

[18] Thriveni, T., Kim, M., & Whan, A. J. (2017). Overview of coffee waste and utilization for biomass energy production in Vietnam. Journal of Energy Engineering, 26(1), 76-83. https://doi.org/10.5855/energy.2017.26.1.076

[19] Delgado, C. E., & Uribe, D. A. (2017). Determinación de la concentración de soda caustica, tiempo de cocción y tamaño de partícula, en la obtención de pulpa para la fabricación de papel a partir de las hojas de caña de azúcar.

[20] Escobar, J. A. (2020). Elaboración y caracterización de biopelículas elaboradas con quitosano y adicionadas con partículas de almidón.

[21] Cabrejos Castillo, K. G., Maluquis Sánchez, J. E., Díaz Ruiz, A., & Minchán Velayarce, H. H. (2024). Caracterización de las propiedades mecánicas del bioplástico de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y compuestos celulósicos de café (*Coffea arabica* L.). *Revista Científica Pakamuros.*

[22] Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., & Chiralt, A. (2019). Improving properties of thermoplastic starch films by incorporating active extracts and cellulose fibres isolated from rice or coffee husk. *Food Packaging and Shelf Life, 22,* 100383. https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2019.100383

[23] Workiye, A., & Woldsenbet, E. (2019). Tensile strength of maize stalk and husk single cellulose fiber. *International Journal of Engineering and Technology, 11(4),* Article 191104013.

[24] Yiga, V. A., Pagel, S., Lubwama, M., Epple, S., Olupot, P., & Bonten, C. (2020). Development of fiber-reinforced polypropylene with NaOH pretreated rice and coffee husks as fillers: Mechanical and thermal properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials, 33(9),* 1269–1291. https://doi.org/10.1177/0892705718823255

[25] Huang, L., Mu, B., Yi, X., Li, S., & Wang, Q. (2016). Sustainable use of coffee husks for reinforcing polyethylene composites. *Journal of Polymers and the Environment, 26(1),* 48–58. https://doi.org/10.1007/s10924-016-0917-x

[26] Amena, B. T., Altenbach, H., Tibba, G. S., & Hossain, N. (2022). Investigation of mechanical properties of coffee husk-HDPE-ABS polymer composite using injection-molding method. *Journal of Composites Science, 6(12),* Article 354. https://doi.org/10.3390/jcs6120354

[27] Azmin, S. M. M., Nasrudin, I. A., Mat Nor, M. S., Abdullah, P. S., & Ch'ng, H. Y. (2024). Development of food packaging bioplastic from potato peel starch incorporated with rice husk silica using response

surface methodology comprehending central composite design. *Food Research*. https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(s2).75

[28] Oluwasina, O., Olaleye, F. K., Olusegun, S. J., Oluwasina, O., & Mohallem, N. (2019). Influence of oxidized starch on physicomechanical, thermal properties, and atomic force micrographs of cassava starch bioplastic film. *International Journal of Biological Macromolecules*, *135*, 282–293. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.150

[29] Hayati, N., & Lazulva, L. (2018). Preparing of cornstarch (*Zea mays*) bioplastic using ZnO metal. *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology (IJCST)*. https://doi.org/10.24114/ijcst.v1i1.10595

[30] Favian, E., & Nugraheni, P. S. (2023). Effect of carrageenan addition on the characteristic of chitosan-based bioplastic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1289(1)*, 012039. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1289/1/012039

[31] Christwardana, M., Ismojo, I., & Marsudi, S. (2021). Physical, thermal stability, and mechanical characteristics of new bioplastic from blends cassava and tannia starches as green material. *International Journal of Biological Macromolecules*, *16(1)*, 46–56. https://doi.org/10.20884/1.JM.2021.16.1.671