

ARTÍCULO ORIGINAL

Caracterización de las propiedades mecánicas del bioplástico de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y compuestos celulósicos de café (*Coffea arabica* L.)

Characterization of the mechanical properties of banana starch bioplastic (*Musa paradisiaca* L.) and cellulosic compounds of coffee (*Coffea arabica* L.)

Karla Cabrejos¹, Jackeline Maluquis¹, Adán Díaz^{1*} y Hans Minchán-Velayarce¹

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue realizar la caracterización de las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido con almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y compuestos celulósicos de la cascarilla de café (*Coffea arabica* L.). Se utilizó almidón en las concentraciones de 9, 12 y 15 % y celulosa en las concentraciones de 2, 4 y 6 % mezclándolos con glicerina, ácido acético, cloruro de calcio y agua destilada. Se caracterizó las propiedades mecánicas tracción, elongación y flexión. El bioplástico con mayor tracción fue la formulación F9 (15% almidón, 6% celulosa) con $2.23 \text{ N} \pm 0.242$ y con menor tracción la formulación F1 (9% almidón, 2% celulosa) con $0.17 \text{ N} \pm 0.069$; la formulación F7 (15% almidón, 2% celulosa) presentó la mayor elongación de $10.3 \text{ cm} \pm 1.528$ y mayor flexión $13.3 \text{ cm} \pm 1.155$; y la formulación F3 (9% almidón, 6% celulosa) tuvo la menor elongación de $3.33 \text{ cm} \pm 0.577$ y menor flexión de $9.33 \text{ cm} \pm 1.155$. El aumento de la concentración de almidón favorece a la tracción, elongación y flexión, el aumento de la concentración de celulosa solo favorece a la tracción, desfavorece a la elongación y es indiferente para la flexión.

Palabras claves: Extracción de almidón, extracción de celulosa, elasticidad, tracción, flexión

ABSTRACT

The objective of this study was to characterize the mechanical properties of the bioplastic obtained from banana starch (*Musa paradisiaca* L.) and cellulosic compounds from coffee husks (*Coffea arabica* L.). Starch was used in concentrations of 9, 12 and 15% and cellulose in concentrations of 2, 4 and 6%, mixing them with glycerin, acetic acid, calcium chloride and distilled water. The mechanical properties of traction, elongation, and bending were characterized. The bioplastic with the highest traction was the F9 formulation (15% starch, 6% cellulose) with $2.23 \text{ N} \pm 0.242$ and the F1 formulation (9% starch, 2% cellulose) with the lowest traction was the F1 formulation (9% starch, 2% cellulose) with $0.17 \text{ N} \pm 0.069$; Formulation F7 (15% starch, 2% cellulose) presented the greatest elongation of $10.3 \text{ cm} \pm 1.528$ and greatest flexion of $13.3 \text{ cm} \pm 1.155$; and formulation F3 (9% starch, 6% cellulose) had the lowest elongation of $3.33 \text{ cm} \pm 0.577$ and the lowest bending of $9.33 \text{ cm} \pm 1.155$. The increase in starch concentration favors traction, elongation and bending, the increase in cellulose concentration only favors traction, disfavors elongation and is indifferent to bending.

Keywords: Starch extraction, cellulose extraction, elasticity, traction, bending

* Autor para correspondencia

1 Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: cabrejoskarla@gmail.com, jackimaluquis03@gmail.com, adiazr@unj.edu.pe, hans_minchan@unj.edu.pe

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la contaminación por plásticos se ha convertido en una de las principales preocupaciones debido a que generan impactos desfavorables en el medio ambiente porque su proceso de degradación tarda entre 100 a 1000 años. Estos polímeros son fabricados a partir de los derivados del petróleo y por lo tanto son altamente resistentes a la degradación, ante esta problemática surgen nuevas alternativas de tecnología que permiten la obtención de nuevos productos biodegradables a partir de biopolímeros naturales tales como el almidón, celulosa, lignina y otros biopolímeros que se pueden obtener de residuos agrícolas (Osorio y Rubiano, 2019). Los residuos agroindustriales poseen un alto potencial para ser aprovechados en diferentes procesos que incluyen elaboración de nuevos productos, aportar valor agregado y recuperar condiciones ambientales (Vargas y Pérez, 2018). Los residuos del café tienen un alto contenido de celulosa y desempeñan un papel importante para la obtención de un bioplástico cuya utilización contribuiría a la disminución de la contaminación ambiental generada por los plásticos (Cedeño y Zambrano, 2021). El plátano verde y la cascarilla del café se presentan como alternativa para la producción de bioplásticos debido a que contienen polímeros de origen vegetal, pues los residuos de la fruta representan una fuente para la obtención de almidón y de la cascarilla de café se obtiene celulosa. Actualmente los plásticos biodegradables tienen un uso principal en el mercado de envases, gracias a su preservación y protección de productos alimenticios o cualquier otro tipo, lo cual se ve reflejado en la disminución de plásticos derivados del petróleo (Lema y Manzo, 2021).

Jannah et al, (2019) determinaron el efecto de un polímero de soporte, como la quitosana, en las propiedades mecánicas de los bioplásticos. Las etapas de esta investigación fueron la extracción de celulosa del salvado de arroz mediante el método de maceración, la optimización de la concentración de hipoclorito de sodio (NaClO) como agente blanqueador y la fabricación de bioplásticos con diversos tratamientos. El estudio mostró que la concentración óptima de NaClO fue del 2.0%, con un contenido de celulosa del 59.2% en forma de polvo blanco. Concluyeron que el mejor bioplástico fue el de la celulosa-sorbitol-quitosana (CSQ) con una resistencia a la tracción de 0.060 Kg-f/cm² y una elongación del 4.75%. La interacción entre la celulosa del salvado de arroz, la adición de relleno y el plastificante afectó la calidad del bioplástico.

Ortega (2019) desarrolló un bioplástico utilizando paja de arroz y residuos de granos de arroz, la extracción de la celulosa de la paja se llevó a cabo mediante la eliminación de hemicelulosa y lignina, utilizando hidrólisis básica con hidróxido de sodio (NaOH) al 10 %, y luego se blanqueó la pulpa utilizando hipoclorito de sodio (NaClO) al 1 %. Para obtener el almidón, los residuos de granos de arroz se trituraron, se mezclaron con agua, se permitió que la mezcla sedimentara, se filtró y finalmente se secó el almidón. Los porcentajes de recuperación obtenidos fueron aproximadamente 42.06% ± 3.21% para la celulosa y 47.44% ± 7.09% para el almidón. En la etapa de elaboración del bioplástico, se crearon dos

formulaciones con diferentes proporciones de almidón y celulosa. Estos componentes se mezclaron con ácido acético, glicerina y agua, y luego se procedió a la obtención de los resultados correspondientes. Se concluyó que el mejor bioplástico fue la formulación con 20 g de almidón, 4 g de celulosa, 10 mL de glicerina, 5 mL de ácido acético y 61 mL de agua destilada.

Ante la problemática descrita, la presente investigación propone una solución dando un valor agregado a estas materias primas con la finalidad de reducir el impacto generado por el plástico derivado del petróleo a través de la obtención de un bioplástico obtenido de desechos de café. El objetivo de la investigación fue caracterizar las propiedades mecánicas del bioplástico de almidón de plátano (*M. paradisiaca* L.) y compuestos celulósicos de la cascarilla de café pergamino (*C. arabica* L.) y los objetivos específicos fueron: a) determinar el rendimiento de extracción de almidón de plátano verde (*Musa paradisiaca* L.), b) determinar el rendimiento de extracción de los compuestos celulósicos de la cascarilla del café (*Coffea arabica* L.) pergamino, c) formular bioplásticos con diferentes concentraciones de almidón y compuestos celulósicos, d) determinar las propiedades mecánicas del bioplástico obtenido.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto fue ejecutado en el laboratorio Taller de Tecnología de Alimentos del Departamento de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Jaén.

Extracción de almidón de plátano verde

Se utilizó plátano verde de la variedad criollo o común procedente de la localidad de Huabal (Región Cajamarca), se lavaron con agua potable de la red pública para eliminar restos de tierra y otros materiales. Luego se colocaron en inmersión en una solución de NaClO al 0.005% p/v (50 ppm) durante 10 min. Se separó la cáscara de la pulpa, ésta se dejó en inmersión en una solución de NaHSO₃ al 0.5%. Se cortó la pulpa en rodajas de aproximadamente 5 mm de espesor y se licuó en una licuadora industrial (Croydon/TC25-26339/Brasil) hasta obtener una pasta fina. Se diluyó con agua destilada en una proporción respecto a la pulpa de 2:1. Se filtró la mezcla en un balde y se dejó decantar en refrigeración a 6 °C por 1 h. Se decantó el sobrenadante y se añadió agua destilada helada para su lavado, agitándolo durante 10 min y luego se llevó a reposo a 6 °C por 24 h, al almidón extraído se le realizaron lavados sucesivos mediante decantación. El almidón obtenido se llevó a secar en estufa (Kertlab/TC25-26339-7/USA) a una temperatura de 60 °C por 24 h. El almidón seco obtenido se trituró en un mortero y se volvió a colocar en la estufa a 60 °C hasta que su humedad sea inferior al 14% determinado con un analizador de humedad (Sartorius/MA35/Alemania). Para la identificación del almidón se realizó la prueba de Lugol, la coloración azul intenso confirmó su presencia.

Extracción de celulosa de cascarilla de café pergamino

Se empleó el método desarrollado por Ortega (2019) con algunas modificaciones. Se utilizó cascarilla de café pergamino procedente de la localidad de Chirinos (Región Cajamarca), se lavó con abundante agua corriente de la red pública con la finalidad de eliminar impurezas. Se colocó la cascarilla lavada en escurridores de acero inoxidable, luego se llevó a secar en estufa a 65 °C durante 24 h y posteriormente se molió empleando un molino eléctrico, se tamizó (tamiz N° 60 de 250 micras) y se almacenó en bolsas herméticas a temperatura ambiente.

En una balanza (Ohaus/PAJ12102/Perú) se pesó 70 g de cascarilla tamizada, se colocó en un vaso de precipitados de 800 mL, se agregó 560 mL de NaOH al 10 % (p/v) para eliminar la hemicelulosa, lignina y otras sustancias, la mezcla se calentó a 60 °C con agitación magnética durante 4 h y se dejó reposar durante 20 min, se decantó el líquido sobrenadante quedando las fibras de celulosa. A la celulosa decantada se le añadió 600 mL agua destilada, se agitó durante 10 min y se dejó reposar durante 2 h, luego se decantó el líquido sobrenadante, a la fibra de celulosa obtenida se sometió a un proceso de blanqueamiento utilizando 800 mL de NaClO al 2% (p/v), durante 20 min en un agitador magnético (Velp/F2053C162/Perú). Este proceso se repitió de manera iterativa hasta lograr la completa decoloración de la fibra de celulosa, luego se lavó mediante decantación hasta su neutralización del líquido sobrenadante (pH 7). Se secó en una estufa (Kertlab/TC25-26339-7/USA) durante 19 horas a 60 °C, se trituró en un mortero y se tamizó (tamiz N° 60 de 250 micras), se registró su peso y se almacenó la fibra de celulosa en bolsa hermética a temperatura ambiente.

Elaboración del bioplástico

Se efectuaron 9 formulaciones tal como se muestra en la Tabla 1 con tres repeticiones cada una.

Tabla 1

Formulaciones de bioplástico para cada tratamiento.

Formulación	Almidón (g)	Celulosa (g)	Agua Destilada (mL)	Ácido acético (mL)	Glicerina (mL)	CaCl ₂ (g)
F-1	9	2	77	1	10	1
F-2	9	4	75	1	10	1
F-3	9	6	73	1	10	1
F-4	12	2	74	1	10	1
F-5	12	4	72	1	10	1
F-6	12	6	70	1	10	1
F-7	15	2	71	1	10	1
F-8	15	4	69	1	10	1
F-9	15	6	67	1	10	1

Se mezcló almidón de plátano con agua destilada mediante agitación constante hasta obtener una suspensión uniforme. Se añadió glicerina, ácido acético y cloruro de calcio. Se calentó la mezcla a 80 °C en agitación constante hasta la gelificación del almidón, luego se añadió la celulosa en suspensión con el agua destilada restante y se continuó con el calentamiento (aproximadamente 30 min) hasta formar una mezcla fluida uniforme. Se colocó la mezcla en las placas Petri previamente envueltas con plástico film con la finalidad de retirar con facilidad el bioplástico y se dejó secar durante cinco días a temperatura ambiente. Se separó el bioplástico de las placas y se acondicionaron en tapers de polietileno.

Determinación de las propiedades mecánicas del bioplástico

Las propiedades mecánicas elongación y flexión se evaluaron siguiendo el método propuesto por Guerrero (2020) con ligeras modificaciones.

Elongación. Esta propiedad mecánica se midió en un instrumento en el cual se fijó una base de mezanine y 2 sujetadores mecánicos, los bioplásticos fueron cortados en forma rectangular con dimensiones de 12 cm x 1.5 cm, se colocó las muestras fijando con un sujetador mecánico uno de los extremos, se procedió a jalar del extremo libre lentamente hasta la ruptura y se registró la distancia alcanzada,

Flexión. Esta propiedad mecánica se midió con un instrumento manual de flexión de tres puntos, en el cual se fijó la muestra de bioplástico por sus extremos de manera horizontal, en dos sujetadores mecánicos separados entre sí 10 cm y con la ayuda de un gancho en el centro de la tira del bioplástico se jaló hasta el instante de su ruptura y se registró la distancia desplazada.

Tracción. El instrumento fue hecho utilizando una caja rectangular, en la base se atornilló un sujetador mecánico que fijó un extremo la muestra. En la parte superior se colocó una balanza de triple brazo (MB2610/Schoolab/China). Por debajo del platillo de la balanza, se extiende a través de un agujero ubicado a 10 cm del lado izquierdo, un gancho que tendrá un sujetador para fijar el otro extremo de la muestra. Las muestras de bioplástico fueron cortadas con dimensiones de 12 cm x 1.5 cm. Se colocaron las muestras por los extremos en los sujetadores. Luego se equilibró la balanza, de tal manera que la muestra se estabilice (la aguja marque cero). Luego se movieron las pesas hasta que se produzca la ruptura y se registró el peso (fuerza) empleado en el proceso.

RESULTADOS

Se obtuvo almidón con un rendimiento de 10.42% y 10.44% de humedad y celulosa con un rendimiento de 28.10% con una humedad de 10.40%.

En la Tabla 2 se muestran los valores de las mediciones de la tracción de las nueve formulaciones y sus repeticiones, así como sus promedios. Se observa que la formulación F1 (CA: 9%/CC: 2%) tiene el menor valor y la formulación F9 (CA: 15%/CC: 6%) el mayor valor.

Tabla 2

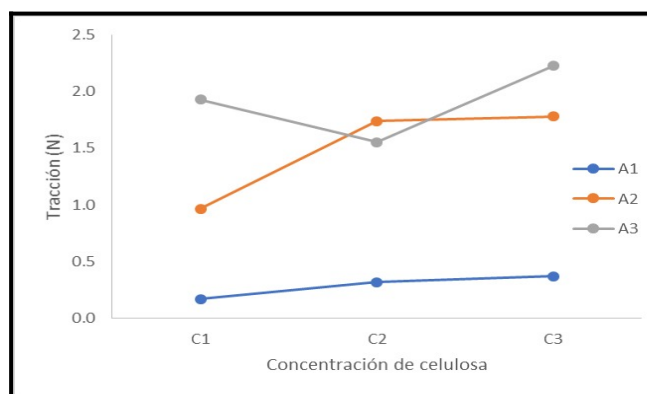
Repeticiones y promedio de los valores del indicador tracción.

Formulación	R1	R2	R3	Promedio (N)
F1	0.235	0.176	0.098	0.170 ±0.069
F2	0.286	0.343	0.325	0.318 ±0.029
F3	0.382	0.34	0.392	0.371 ±0.028
F4	1.17	1.162	0.568	0.967 ±0.345
F5	1.725	1.758	1.735	1.739 ±0.017
F6	1.722	1.848	1.765	1.778 ±0.064
F7	1.961	1.668	2.157	1.929 ±0.246
F8	1 550	1 590	1 560	1.552 ±0.021
F9	2.255	1.97	2.451	2.225 ± 0.242

En la Figura 1 se observa que el mayor valor de tracción se obtiene con la interacción A3:C3 y una menor fuerza de tracción con la interacción A1:C1. así mismo, se aprecia que a medida que aumenta las concentraciones de almidón y celulosa, aumenta el valor de la tracción

Figura 1

Interacción - Concentración de almidón: concentración de celulosa con respecto a la tracción.



Elongación

Los valores de las mediciones de la elongación se muestran en la Tabla 3. Se observa que la formulación F3 (CA:9 g/CC: 6 g) tiene el menor valor y la formulación F7 (CA: 15 g/CC: 2 g) el mayor valor.

Tabla 3

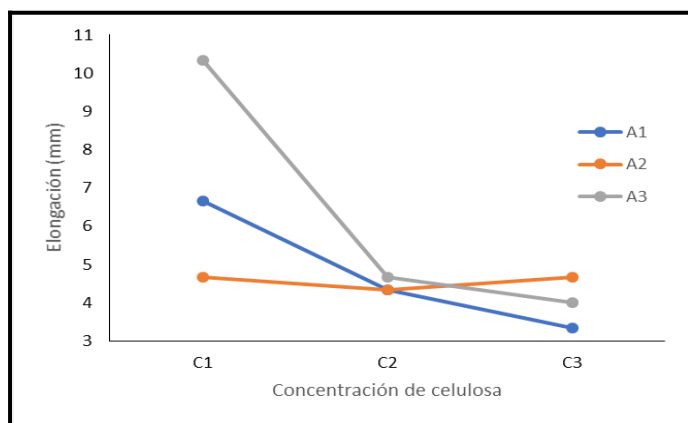
Repeticiones y promedio de los valores del indicador elongación.

Formulación	R1	R2	R3	Promedio (cm)
F1	6.00	7.00	7.00	6.667 ±0.577
F2	5.00	4.00	4.00	4.333 ± 0.577
F3	3.00	3.00	4.00	3.333 ±0.577
F4	4.00	5.00	5.00	4.667±0.577
F5	5.00	4.00	4.00	4.333 ± 0.577
F6	4.00	5.00	5.00	4.667±0.577
F7	9.00	10.0	12.0	10.333 ± 1.528
F8	5.00	5.00	4.00	4.667±0.577
F9	4.00	4.00	4.00	4.000 ±0.000

En la Figura 2 se observa que el mayor valor de elongación se obtiene con la interacción A3:C1 y una menor fuerza de elongación con la interacción A1:C3. así mismo, se aprecia que a medida que aumenta las concentraciones de celulosa, disminuye el valor de la elongación.

Figura 2

Interacción - concentración de almidón: concentración de celulosa con respecto a la elongación



Flexión

En la Tabla 4 se muestran los valores de mediciones de la flexión. Se observa que la formulación F3 tiene la menor flexión y la formulación F7 el mayor valor.

Tabla 4

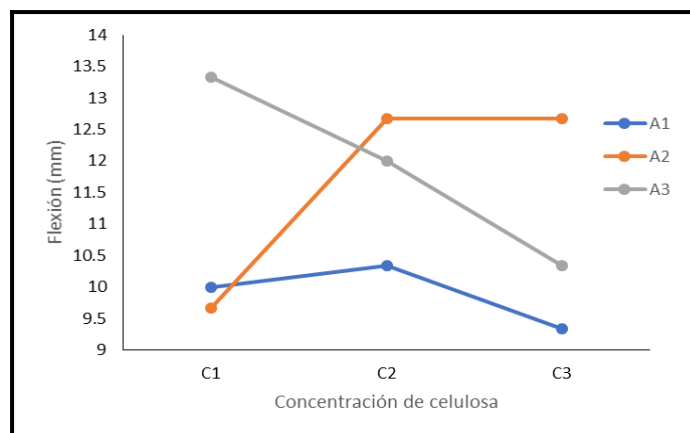
Repeticiones y promedio de los valores del indicador Flexión.

Formulación	R1	R2	R3	Promedio (cm)
F1	9.00	11.0	10.0	10.000 ± 1.000
F2	11.0	10.0	10.0	10.333 ± 0.577
F3	10.0	8.00	10.0	9.333 ± 1.155
F4	12.0	8.00	9.00	9.667 ± 2.082
F5	13.0	12.0	13.0	12.667 ± 0.577
F6	11.0	13.0	14.0	12.667 ± 1.528
F7	12.0	14.0	14.0	13.333 ± 1.155
F8	11.0	12.0	13.0	12.000 ± 1.000
F9	10.0	10.0	11.0	10.333 ± 0.577

En la Figura 3 se observa que el mayor valor de flexión se obtiene con la interacción A3:C1 (F7) y una menor fuerza de flexión con la interacción A1:C3 (F3) así mismo, se aprecia que a medida que aumenta las concentraciones de Almidón y Celulosa, aumenta el valor de la flexión.

Figura 3

Interacción - concentración de almidón: concentración de celulosa con respecto a la flexión.



Comparación de medias Tukey para las variables respuesta Tracción, Elongación y flexión

En la Tabla 5 se muestra la comparación de medias Tukey para las variables respuestas para el factor de estudio concentración de almidón. Se observa que el incremento de la concentración impacta notablemente en la tracción y en menor medida en la flexión y elongación.

Tabla 5

Comparaciones de medias de Tukey para las diferentes respuestas al evaluar la concentración de almidón.

Tratamientos	Tracción	Elongación	Flexión
A1	0.286 ± 0.099 ^c	4.78 ± 1.56 ^b	9.89 ± 0.928 ^b
A2	1.49 ± 0.434 ^b	4.56 ± 0.53 ^b	11.7 ± 2.00 ^a
A3	1.90 ± 0.339 ^a	6.33 ± 3.12 ^a	11.89 ± 1.54 ^a

Nota. A mayor concentración de almidón aumenta la tracción, elongación y flexión.

En la Tabla 6 se muestra la comparación de medias Tukey para las variables respuestas para el factor de estudio concentración de celulosa. Se observa que el incremento de la concentración impacta en la tracción y elongación, pero es indiferente para la flexión.

Tabla 6

Comparaciones de medias de Tukey para las respuestas al evaluar la concentración de celulosa.

Tratamientos	Tracción	Elongación	Flexión
C1	1.02 ± 0.792 ^b	7.22 ± 2.64 ^a	11.00 ± 2.18 ^a
C2	1.20 ± 0.669 ^b	4.44 ± 0.53 ^b	11.67 ± 1.22 ^a
C3	1.46 ± 0.847 ^a	4.0 ± 0.71 ^b	10.78 ± 1.79 ^a

En la Tabla 7 se observa el resumen de las variables respuestas estudiadas. Con respecto a la fuerza de tracción, se observó un máximo del valor al aplicar la formulación 9 (A3:C3). Además, las formulaciones 6, 7 y 9 se encuentran en el mismo grupo estadístico; por lo que, podemos indicar que las formulaciones 6, 7 y 9 son similares estadísticamente ($p > 0.05$). Debido a este resultado, podemos decir que la formulación 7 (A3:C1) obtuvo los mayores valores de las variables respuestas estudiadas.

La variable respuesta tracción es favorecida por el aumento de concentración de celulosa. Sin embargo, el aumento de concentración de celulosa no es favorable para la elongación y en la flexión la concentración de celulosa no afecta la variable respuesta tracción.

Tabla 7

Comparaciones de medias de Tukey para las respuestas al evaluar la interacción concentración de almidón – concentración de celulosa.

Formulaciones	Tracción (N)	Elongación (cm)	Flexión (cm)
FI (A1:C1)	0.17±0.069 ^d	6.67± 0.577 ^b	10.0 ± 1.000 ^{ab}
F2 (A1:C2)	0.32± 0.029 ^d	4.33 ±0.577 ^c	10.3 ± 0.577 ^{ab}
F3 (A1:C3)	0.37±0.028 ^d	3.33 ±0.577 ^c	9.33 ± 1.155 ^b
F4 (A2:C1)	0.97 ± 0.345 ^c	4.67±0.577 ^{bc}	9.67±2.082 ^b
F5 (A2:C2)	1.74±0.017 ^b	4.33 ±0.577 ^c	12.7± 0.577 ^{ab}
F6 (A2:C3)	1.78±0.064 ^{ab}	4.67± 0.577 ^{bc}	12.7 ± 1.528 ^{ab}
F7 (A3:C1)	1.93±0.246 ^{ab}	10.3 ± 1.528 ^a	13.3 ± 1.155 ^a
F8 (A3:C2)	1.55±0.021 ^b	4.67±0.577 ^{bc}	12.0 ± 1.00 ^{ab}
F9 (A3:C3)	2.23 ± 0.242 ^a	4.00 ± 0.000 ^c	10.3 ± 0.577 ^{ab}

Nota. A: almidón; C: celulosa

Se muestran las comparaciones de medias de las variables respuestas para las formulaciones, en la que se observa que la formulación F6, F7 y F9 tienen los más altos promedios para la variable tracción destacándose la formulación F9 como la mejor. En cuanto la variable elongación el tratamiento F7 tiene el mejor promedio, así mismo, esta formulación tiene el mejor promedio para la flexión, aunque se observa que presenta un comportamiento similar a las demás formulaciones.

DISCUSIÓN

Se obtuvo almidón de fécula de plátano verde (*Musa paradisiaca L.*) de la variedad “criollo” o “común” con un rendimiento de 10.42%, este resultado es menor que el obtenido por Mantilla (2021), quien reportó un rendimiento de 17% de almidón de fécula de plátano verde de variedad “Dominico Hartón”. Esta diferencia puede deberse a que se trata de diferentes variedades, por otra parte, Guerrero (2020) reportó un rendimiento de 12.5% de almidón de fécula de plátano verde (*Musa paradisiaca L.*) de variedad “Bellaco” cercano al resultado obtenido, así mismo, Iguardia (2013) reportó la extracción de almidón de fécula de banano verde (*Musa sapientum*) de variedad “Cavendish” con un rendimiento de 24.03% que supera al doble del rendimiento obtenido, respaldando que la cantidad de almidón está influenciado por la variedad del fruto.

Se obtuvo un rendimiento de 28.10% de celulosa de cascarilla de café pergamino (*C. arabica L.*) empleando el método de hidrólisis básica, el resultado es menor que el obtenido por Bohórquez (2017) 58.83%, así mismo, Rodríguez (2022) reportó 51.01% de rendimiento de celulosa de cascarilla de café pergamino (*C. arabica L.*), mientras que Arias y Meneses (2016) obtuvieron un rendimiento de 36.70%

de celulosa y además Rojas y Hernández (2022) reportaron un rendimiento promedio de extracción de alfa celulosa del 57.23% de pulpa de café, como se observa los rendimientos reportados por las referencias y lo obtenido son diferentes, estas diferencias pueden deberse a diversos factores, tales como el método de obtención, a la variedad de café y calidad de los reactivos usados, tal como lo menciona (Rodríguez, 2022).

Según los resultados, tal como se muestran en la Tabla 3, a mayor concentración de almidón aumenta la fuerza de tracción, elongación y flexión, es decir, la resistencia a la tracción, elongación y flexión es favorecido por el incremento de almidón, sin embargo, el aumento de la concentración de celulosa solo favorece a la tracción, desfavorece a la elongación y es indiferente para la flexión, tal como se muestra en la Tabla 6. Por otra parte, en la Tabla 7 se muestra la interacción de ambas variables (concentración de almidón y concentración de celulosa), observándose que la formulación 7 (almidón 15% y celulosa 2%) presenta los mejores promedios para las variables respuestas tracción, elongación y flexión.

Los resultados obtenidos para la tracción concuerdan con los hallados por Rendón et al. (2022), indicaron que al incrementar mayor concentración de celulosa en la formulación de bioplástico a base de almidón y microcelulosa de residuos de mango, aumentó la tracción, asimismo, Agustin et al. (2014) quienes reportaron que al aumentar la concentración de celulosa nanocristalina de pajilla de arroz en la formulación de bioplástico a base de almidón comercial, incrementó significativamente la tracción, este efecto de reforzamiento aportado por la celulosa se debe a la dispersión de las fibras en el bioplástico, ya que la interacción entre el material de refuerzo y la matriz polimérica determinan las propiedades mecánicas. El mismo efecto fue reportado por Fourati et al. (2021) al añadir celulosa nanocristalina al bioplástico a base de la mezcla de adipato de butileno-co-tereftalato)/poliester y almidón termoplástico (PBAT/TPS), sin embargo, Nugroho et al. (2020) indicó que la adición de almidón, celulosa y celulosa modificada con ácidos grasos en la formulación de biopelícula disminuyó la tracción.

La elongación se ve favorecida por una menor concentración de celulosa (C1) y mayor concentración de almidón (A3). Sin embargo, una mayor concentración de celulosa (C3) y menor concentración de almidón (A1) ejerce el efecto contrario en el bioplástico. Resultados similares fueron obtenidos por Maulida et al. (2016) al añadir celulosa microcristalina en la elaboración de bioplástico a partir de almidón de cáscara de yuca, donde la elongación disminuyó con la adición de celulosa microcristalina. Posiblemente se deba a los enlaces hidrógeno entre el grupo hidroxilo (O-H) del almidón y los grupos hidroxilo y carboxilo (COOH) de la celulosa. Esta unión originó la reducción de la elongación. Asimismo, Agustin et al. (2014) y Bilo et al. (2018) determinaron que al aumentar el porcentaje de

celulosa nanocristalina de pajilla de arroz en la formulación bioplástico a base de almidón, la elongación también se ve afectada.

Sin embargo, Lubis et al. (2018) determinó que a mayor concentración de almidón de fruto de Jack y menor concentración de celulosa microcristalina disminuye la elongación. La disminución en la elongación se debe a la fuerte interacción entre las sustancias que componen el bioplástico (moléculas de almidón con las fibras de la celulosa). Estos resultados son similares de los logrados en la investigación, según la Tabla 14. Una mayor concentración de celulosa no favorece la elongación debido a que hay mayor presencia de fibras en el bioplástico lo que genera que sea más compacto.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron 2322.64 g de almidón proveniente de 22611 g de pulpa de plátano que representa un rendimiento de extracción de almidón de plátano verde (*M. paradisiaca* L.) de 10.42%.

El rendimiento de extracción de compuestos celulósicos de la cascarilla del café (*C. arabica* L.) pergamino fue de 28.10%, que representa a 137.67 g de celulosa proveniente de 490 g de cascarilla de café pergamino.

Se elaboraron 9 formulaciones, los bioplásticos F1, F2 y F4 fueron transparentes debido a la poca concentración de celulosa, F1 y F2 de poca consistencia; F3 y F5 fueron blancos lechosos pero compactos, F6 fue blanco lecho y quebradizo debido a la alta proporción de celulosa. F7 fue lechoso traslúcido, consistente y elástico; F8 y F9 presentaron coloración blanco lechoso y consistentes por el alto contenido en almidón y celulosa.

La formulación F7 presentó mejores propiedades mecánicas, resistencia a la tracción, mejor elongación y flexión, que corresponde al bioplástico con una composición de 15 g de almidón y 2 g de celulosa, además, el aumento de la concentración de almidón favorece a la tracción, elongación y flexión, sin embargo, el aumento de la concentración de celulosa solo favorece a la tracción, desfavorece a la elongación y es indiferente para la flexión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agustin, M. B., Ahmmad, B., Alonzo, S. M. M., y Patriana, F. M. (2014). Bioplastic based on starch and cellulose nanocrystals from rice straw. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(24), 2205-2213. <https://doi.org/10.1177/0731684414558325>.

- Arias, R., y Meneses, J. (2016). *Caracterización físico-química de los residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de biotenoal*, [Tesis, Universidad Nacional Autónoma de Managua]
- Bilo, F., Pandini, S., Sartore, L., Depero, L. E., Gargiulo, G., Bonassi, A., Federici, S., y Bontempi, E. (2018). A sustainable bioplastic obtained from rice straw. *Journal of Cleaner Production*, 200, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.252>
- Bohórquez, N. (2017). *Factibilidad de la obtención de celulosa a partir de los residuos provenientes de la trilla del café*. [Tesis, Fundación Universidad de América. Colombia]. <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6327>
- Cedeño, N., y Zambrano, J. C. (2021). *Diseño de una línea de producción para la obtención de bioplásticos aprovechando los residuos de café a escala Industrial en la ciudad de Quevedo*. [Tesis. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6115>
- Fourati, Y., Tarrés, Q., Delgado-Aguilar, M., Mutjé, P., y Boufi, S. (2021). Cellulose nanofibrils reinforced PBAT/TPS blends: Mechanical and rheological properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.102>
- Guerrero, L. (2020). *Grado de biodegradabilidad del bioplástico elaborado con almidón de plátano verde (Musa paradisiaca L.)*. [Tesis. Universidad Nacional de Jaén. Perú]
- Iguardia, C. H. (2013). *Síntesis y Caracterización de Bioplástico a partir de Almidón de Banano Verde (Musa sapientum variedad Cavendish)*. [Tesis. Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3523.pdf
- Jannah, M., Ahmad, A., Hayatun, A., Taba, P., y Chadijah, S. (2019). Effect of filler and plastisizer on the mechanical properties of bioplastic cellulose from rice husk. *Journal of Physics: Conference Series*, 1341(3), 032019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/3/032019>
- Lema, E., y Manzo, S. (2021). *Diseño de una línea de producción de bioplástico a partir de residuos del cacao con aplicación en envasado de alimentos*. [Tesis. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6113>
- Lubis, M., Gana, A., Maysarah, S., Ginting, M. H. S., y Harahap, M. B. (2018). Production of bioplastic from jackfruit seed starch (*Artocarpus heterophyllus*) reinforced with microcrystalline cellulose from cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.) using glycerol as plasticizer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309, 012100. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012100>

- Mantilla, C. A. (2021). *Extracción de almidón de plátano Dominic Hartón y síntesis de biopolímeros para la evaluación de su comportamiento en pruebas de resistencia a la tracción y el agua*. [Tesis. Universidad Libre. Colombia]. <https://hdl.handle.net/10901/19519>
- Maulida, Siagian, M., y Tarigan, P. (2016). Production of Starch Based Bioplastic from Cassava Peel Reinforced with Microcrystalline Cellulose Avicel PH101 Using Sorbitol as Plasticizer. *Journal of Physics: Conference Series*, 710, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/710/1/012012>
- Nugroho, F. G., Nizardo, N. M., y Saepudin, E. (2020). Synthesis of citric acid crosslinked PVA/tapioca starch bioplastic reinforced with grafted cellulose. *Conferencia AIP. Proc.* 2242(1). <https://doi.org/10.1063/5.0010357>
- Ortega, M. (2019). Elaboración de bioplástico a partir de paja y residuos de granos de arroz. [Tesis, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/2810>
- Osorio, A. P. O., y Rubiano, K. D. R. (2019). *Desarrollo de una biopelícula partiendo de cáscara de banana y fibra natural como agente de refuerzo a nivel de laboratorio*. [Tesis, Fundación Universidad de América. Colombia].
- Rendón, R., Lorenzo, M. A., Olvera, R., y Trujillo, C. A. (2022). Bioplastic composed of starch and micro-cellulose from waste mango: *Mechanical properties and biodegradation*. *Polímeros*, 32(3), e2022026. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20210031>
- Rodríguez, I. (2022). *Pulpa de celulosa a partir de cascarilla de café (Coffea arabica) por el método alcalino*. [Tesis. UNAN-Managua]. <http://repositorio.unan.edu.ni/19546/>
- Rojas, E. A., y Hernández, G. (2022). Aprovechamiento tecnológico de la pulpa de café en la obtención de un producto vaso biodegradable. [Repositorio Universidad de La Salle, Bogotá].
- Vargas, Y. A., y Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos Agroindustriales para el mejoramiento de la Calidad del Ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 59-72. DOI: <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>