

Design of a process for the elaboration of a Prototype of a Biodegradable packaging based on Coffee Husk

Juvencio Brios-Avendaño¹, Doctor, Guillermo Aguilar-Castro¹, Bachiller, Bertha Villalobos-Meneses¹, Doctor, Alminton Torres-Quiroz¹, Doctor, Silvia Rúa-Pomahuacre¹, Maestra, Erika Zevallos-Vera¹, Doctor, Alex Vallejos-Zuta¹, Maestro

¹*Universidad Nacional del Callao, Perú, jhbriosa@unac.pe, gaguilar@unac.edu.pe, bmwillalobosm@unac.edu.pe, agtorresq@unac.edu.pe, spruap@unac.edu.pe, aavallejosz@unac.edu.pe*

Abstract—The growing concern for the reduction of waste and pollution has driven the search for sustainable solutions, highlighting the use of solid waste from the coffee industry, such as husks, rich in useful compounds. This research focused on using coffee husks to design a manufacturing process for biodegradable packaging, using a mixture of crushed husks, glycerin (30%) and white vinegar (20%). The results were satisfactory, as the mixture maintained its shape during molding, allowing the obtaining of a biodegradable container with good structural integrity. Analysis of the texture of the bioplastic revealed that it is brittle, brittle and not very elastic, depending on the relative humidity. The hardness of the material was varied according to the concentrations of the inputs, which reflected the analysis of the texture profile, while the fracture ability was moderate, which allowed the container to retain its structure without fractures. In accordance with the UNE EN 14411 standard, the bending strength of the packaging was positively evaluated, with an estimated total degradability in six months, demonstrating that the biodegradable packaging developed has a good performance in terms of resistance, hardness and flexibility for handling.

Keywords— Flexion, hardness, fracture ability, texture, deflection.

Diseño de un proceso para elaboración de un Prototipo de envase Biodegradable a base de Cascarilla de Café

Juvencio Brios-Avendaño¹, Doctor, Guillermo Aguilar-Castro¹, Bachiller, Bertha Villalobos-Meneses¹, Doctor, Alminton Torres-Quiroz¹, Doctor, Silvia Rúa-Pomahuacre¹, Maestra, Erika Zevallos-Vera¹, Doctor, Alex Vallejos-Zuta¹, Maestro

¹Universidad Nacional del Callao, Perú, jhbriosa@unac.pe, gaguilar@unac.edu.pe, bmvillalobosm@unac.edu.pe, agtorresq@unac.edu.pe, spruap@unac.edu.pe, aavallejosz@unac.edu.pe

Resumen– La creciente preocupación por la reducción de desperdicios y la contaminación ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles, destacándose el aprovechamiento de residuos sólidos de la industria del café, como la cascarilla, rica en compuestos útiles. Esta investigación se centró en utilizar la cascarilla de café para diseñar un proceso de fabricación de envases biodegradables, empleando una mezcla de cascarilla triturada, glicerina (30%) y vinagre blanco (20%). Los resultados fueron satisfactorios, pues la mezcla mantuvo su forma durante el moldeo, permitiendo la obtención de un envase biodegradable con buena integridad estructural. El análisis de la textura del bioplástico reveló que es quebradizo, frágil y poco elástico, dependiendo de la humedad relativa. La dureza del material se mostró variada según las concentraciones de los insumos, lo cual reflejó el análisis del perfil de textura, mientras que la fracturabilidad fue moderada, lo que permitió que el envase conservara su estructura sin fracturas. De acuerdo con la norma UNE EN_14411, la resistencia a la flexión del envase fue evaluada positivamente, con una degradabilidad total estimada en seis meses, demostrando que los envases biodegradables desarrollados tienen un buen desempeño en cuanto a resistencia, dureza y flexibilidad para su manipulación.

Palabras clave– Flexión, dureza, fracturabilidad, textura, deflexión

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la contaminación plástica ha generado impactos económicos y ambientales significativos [1]. Un caso alarmante es el de las islas de basura en los océanos, como la Gran Mancha de Basura del Pacífico, en la que se acumulan millones de toneladas de residuos plásticos que perjudican la biodiversidad marina y las economías pesqueras [2], [3]. Según estimaciones del Foro Económico Mundial, los volúmenes relacionados con la contaminación plástica superan los 37 millones de toneladas anuales, debido a la degradación de ecosistemas y la disminución de la actividad turística y comercial [4].

A nivel internacional, diversos países han establecido normativas para disminuir el uso de plásticos de un solo uso e impulsar materiales biodegradables [5]. En la Unión Europea, la Directiva 2019/904 prohíbe ciertos productos plásticos y fomenta el uso de envases sostenibles [6]. Por otra parte, Alemania ha desarrollado incentivos para el uso de bioplásticos y materiales reciclados en la industria del embalaje [7]. En Asia, Japón ha promovido tecnologías de biopolímeros basadas en desechos agrícolas, impulsando la investigación y la inversión

en envases biodegradables [8]. Estos avances evidencian el interés mundial por alternativas que reduzcan la dependencia de los plásticos convencionales.

En América Latina, países como Colombia y Chile han implementado acciones específicas para disminuir el uso de plásticos y promover la adopción de materiales biodegradables [9]. En 2021, Colombia aprobó una ley que prohíbe la producción y comercialización de plásticos de un solo uso a partir de 2030 [10], promoviendo el desarrollo de opciones ecológicas como los bioplásticos fabricados con desechos agrícolas. Por otro lado, Chile ha establecido normativas para la administración de desechos y promueve la inversión en biotecnología para envases sostenibles [11].

En el contexto peruano, el uso de bioplásticos y materiales biodegradables todavía están en desarrollo, pero existen iniciativas prometedoras. En 2018, el gobierno promulgó la Ley N° 30884, que regula el plástico de un solo uso y promueve la adopción de alternativas sostenibles [12]. Además, en la agroindustria se han promovido iniciativas de economía circular [13], [14], aprovechando residuos como la cascarilla de café [15], el bagazo de caña [16] y otros subproductos agrícolas para la fabricación de envases biodegradables.

Según [17] uno de los retos más significativos en la producción de bioplásticos es su escalabilidad industrial, por lo que se han explorado envases biodegradables derivados de subproductos del café a través de métodos como la extrusión y el moldeo por compresión. Sin embargo, todavía existen desafíos en sus propiedades mecánicas y viabilidad comercial. En esta línea, [18] investiga la incorporación de celulosa extraída de residuos de café en biocomposites de PBAT (Tereftalato de Adipato de Polibutileno), mejorando su resistencia mecánica y propiedades de barrera, aunque su alto costo sigue siendo un obstáculo para su adopción masiva. Por otro lado, [19] desarrolla películas biodegradables combinando residuos de café con biopolímeros de algas marinas, obteniendo mejoras en hidrofobicidad y resistencia a la tracción (35,47 MPa), lo que demuestra su potencial en la industria del envasado sostenible.

El objetivo de este estudio es diseñar un proceso eficiente para la elaboración de un prototipo de envase biodegradable a base de cascarilla de café, evaluando sus propiedades físicas, mecánicas y su impacto ambiental. Se busca definir criterios de calidad y desarrollar pruebas experimentales para determinar la viabilidad del material en aplicaciones comerciales,

contribuyendo a la reducción del uso de plásticos convencionales.

Este análisis abordará el diseño del proceso productivo para la elaboración del envase biodegradable, considerando factores como la selección de materiales, las técnicas de procesamiento, la evaluación de biodegradabilidad y las pruebas de calidad. Asimismo, se explorarán aplicaciones potenciales en la industria alimentaria y se analizará la viabilidad económica del producto en el mercado. Esta investigación tiene como finalidad, crear conocimiento aplicable y contribuir a la transición hacia un modelo de producción más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se enfocó en el desarrollo de un envase biodegradable elaborado a partir de cascarilla de café, con el objetivo de proporcionar una alternativa sostenible y ecológica a los envases convencionales. Para la producción de este envase, se utilizaron diversos materiales, maquinaria e instrumentos que permitieron optimizar el proceso de fabricación, garantizando la calidad y funcionalidad del producto final. A continuación, se detallan los materiales utilizados, las máquinas y herramientas involucradas, además de los equipos de laboratorio que fueron esenciales para la realización de las pruebas experimentales y la preparación de la mezcla.

A. Materiales

Para la elaboración del prototipo de envase biodegradable a base de cascarilla de café, se utilizaron los siguientes materiales:

- 1) *Vinagre*: Se utiliza para ajustar el pH de la mezcla, favoreciendo las propiedades de la goma.
- 2) *Cascarilla de café*: Material principal utilizado para la fabricación de los envases, que proporciona la base fibrosa.
- 3) *Glicerina*: Aglutinante que mejora la flexibilidad del material final.
- 4) *Agua destilada*: Utilizada para preparar la mezcla y diluir los ingredientes.
- 5) *Fécula de maíz*: Utilizada como espesante para aumentar la consistencia de la mezcla.

B. Maquinaria

Las siguientes máquinas fueron esenciales para el proceso de producción del prototipo.

- 1) *Tanque de cocción*: Permite la obtención de la goma, que actúa como aglutinante para dar consistencia a los envases.
- 2) *Mezcladora*: Aplica una fuerza centrípeta sobre los subproductos (polvo de cascarilla y goma) para lograr una mezcla homogénea.
- 3) *Prensa*: Comprime la mezcla homogénea en los moldes, asegurando que los envases adquieran la forma deseada.

4) *Horno industrial*: Calienta los moldes a 200°C durante 15 minutos, proporcionando la dureza necesaria para la consistencia del envase.

5) *Lijadora*: Se utiliza para desbarbar los bordes y superficies de los envases, otorgándoles un acabado adecuado.

6) *Faja transportadora*: Facilita el traslado de los subproductos entre las diferentes etapas del proceso.

7) *Tamizador*: Filtra posibles residuos presentes en la cascarilla de café.

8) *Etiquetadora*: Coloca etiquetas identificativas a cada envase producido.

C. Instrumentos Considerados

Los instrumentos utilizados en este estudio fueron:

1) *Licuadaora*: Sustituyó el trabajo del molino para procesar los ingredientes.

2) *Colador*: Permitió separar las partículas más pequeñas de la cascarilla de café.

3) *Moldes*: Utilizados para dar forma a los envases.

4) *Cocina*: Utilizada para calentar la fibra de coco, el agua y la maicena.

5) *Cuchara*: Utilizada para mover la fibra de coco durante la cocción.

6) *Rodillo*: Para extender la masa a la consistencia deseada.

7) *Balanza analítica*: Para pesar los insumos y el producto final.

8) *Horno*: Permite determinar el porcentaje de ceniza de las muestras.

9) *Estufa*: Permite determinar el porcentaje de humedad de los productos.

10) *pH digital*: Usado para medir el pH con precisión.

11) *Termómetro*: Para medir la temperatura de digestión ajustada entre 90°C ± 5°C.

D. Tiempos del proceso de elaboración

TABLA I
TIEMPOS ESTÁNDAR DEL PROCESO

Procesos	Tiempo Estándar
Molienda	2,25
Mezclado	6,00
Prensado	3,12
Cocción	7,50
Acabado	1,25
Empaquetado	5,00
Tiempo Total	33,67

E. Preparación de la Mezcla

La preparación de la mezcla fue una etapa crucial para la elaboración de los envases biodegradables. En primer lugar, se utilizó almidón de maíz (fécula) como material base y glicerina como aditivo. Se procedió a mezclar tres partes de agua con una parte de fécula de maíz, batiendo la mezcla de manera rigurosa para evitar la formación de grumos. Posteriormente, la mezcla se llevó a cocción a fuego lento.

Se añadió glicerina y vinagre blanco disuelto en una proporción de 40% agua, 30% glicerina y 30% vinagre. Durante el proceso,

se utilizaron diferentes granulometrías de cascarilla de café (tamices 30, 50 y 20) para evaluar cuál ofrecía mejores resultados en la formación y compactación de los envases.

Uno de los problemas encontrados fue que la cascarilla obtenida del tamiz 20, debido a su tamaño, dificulta la compactación, lo que resultaba en la incapacidad de la mezcla para mantener la forma al ser retirada del molde. Sin embargo, al usar cascarilla tamizada a través de los tamices 30 y 50, se observó una mejora significativa en la formación de los envases, ya que partículas más finas facilitaron la compactación.

La mezcla ideal consistió en una combinación de 30% fécula de maíz cocida, 20% glicerina y cascarilla de café triturada proveniente de los tamices 30 y 50. Esta mezcla permitió que los envases mantuvieran su forma al ser retirados del molde y facilitaron el proceso de extracción.

F. Pruebas Experimentales

Se siguió el siguiente procedimiento en las pruebas experimentales:

1) *Recepción*: Se pesaron y analizaron las muestras de cascarilla de café.

2) *Lavado*: Se utilizó agua con HCl para limpiar la cascarilla de café, eliminando organismos y residuos.

3) *Secado*: La cascarilla se secó a temperatura ambiente después del lavado.

4) *Molienda*: La cascarilla fue molida hasta obtener un polvo con tamaño de partícula menor a 0.3 mm.

5) *Mezclado*: Se mezclaron la cascarilla de café, fécula de maíz, glicerina, agua y vinagre para obtener una mezcla uniforme.

6) *Prensado*: Se comprimió la mezcla para formar los envases en el molde.

7) *Cocción*: Los moldes se hornearon a 200°C durante 15 minutos.

8) *Acabado*: Los envases fueron lijados y refinados para obtener el producto final.

9) *Inspección*: Se verificó la calidad de los envases en cuanto a olor, color, forma y dureza.

10) *Empaque*: Los envases fueron empaquetados en unidades de 25.

11) *Almacenamiento*: El producto final fue almacenado para su posterior distribución.

III. RESULTADOS

La cascarilla de café utilizada en este estudio fue recolectada en las zonas de Satipo y Chanchamayo, provenientes de una productora local de café. En total, se obtuvieron 10 kg de cascarilla, los cuales fueron utilizados en el proceso de elaboración de un prototipo de envase biodegradable.

Siguiendo la metodología establecida, la cascarilla de café fue adecuadamente acondicionada antes de proceder a la elaboración de la biopelícula, que permitió la obtención exitosa del envase biodegradable. Este proceso de acondicionamiento y posterior fabricación de la biopelícula representó una etapa crucial para garantizar la calidad y funcionalidad de los envases

producidos. Las Tablas 2, 3, 4, 5 y 6 muestran las propiedades y características de los materiales en consideración.

TABLA II
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA CASCARILLA DEL CAFÉ

Propiedades Físicas	Propiedades Químicas
Densidad a 26°C 1,323 g/cm ³	Humedad = 11,45%
Densidad bruta 0,323 g/cm ³	Lignina = 41,86%
Calor de combustión 4500 cal/ °C g	Cenizas = 0,95%
	Grasas = 5,83%

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

Características Químicas		Características Físicas	
Permeabilidad al vapor de agua	10 g/cm ²	Gramaje	8 +- 5% g
Permeabilidad al oxígeno	8 cc/cm ²	Espesor	0,35 mm
Disolventes Residuales	2 g/cm ²	Resistencia a la tracción	1,2N/15m m
		Alargamiento en rotura	15%
		Color	Blanco
		Textura	Firme

TABLA IV
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CASCARILLA DE CAFÉ

Composición	%
Contenido de Humedad	11,45
Lignina	41,86
Cenizas	0,96
Grasas	5,83
Pentosas	25,5
Furfural	14,76

TABLA V
COMPOSICIÓN FÍSICA DE LA CASCARILLA DE CAFÉ

Composición	%
Densidad a 26°	1,323 g/cm ³
Densidad bruta	0,323 g/cm ³
Calor de combustión	4,500 cal 1°C * g

TABLA VI
RESULTADO DE LA PRUEBA DE PUNTO DE QUIEBRE

Nombre de la mezcla	Punto de quiebre
Lámina de cascarilla de café procedente del tamiz 20	1,4 kg/cm ²
Lámina de cascarilla de café procedente del tamiz 30	2,0 kg/cm ²
Lámina de cascarilla de café procedente del tamiz 50	2,1 kg/cm ²

Los resultados obtenidos corroboran la teoría que establece que, a menor tamaño de las partículas, mayor será la resistencia del material. En este sentido, la lámina elaborada con cascarilla de café proveniente del tamiz 50 presentó los mejores resultados en términos de punto de quiebre, destacándose como la opción con mayor resistencia.

A. Resistencia de los envases biodegradables

Se realizó la prueba de resistencia de los envases biodegradables utilizando cuatro ecuaciones fundamentales para evaluar su comportamiento mecánico. Las ecuaciones

fueron formuladas para analizar diferentes parámetros que afectan la resistencia del material, tales como el tamaño de las partículas, la composición de la mezcla y las condiciones del proceso de cocción. A continuación, se presentan las cuatro ecuaciones utilizadas:

Muestra 1:

$$\% \text{ humedad} = (28,50 \text{ g} - 25,50 \text{ g}) / (25,50 \text{ g}) \times 100$$

(1)

$$\% \text{ humedad} = 10,53\%$$

Muestra 2:

$$\% \text{ humedad} = (29,00 \text{ g} - 25,50 \text{ g}) / (25,50 \text{ g}) \times 100$$

(2)

$$\% \text{ humedad} = 12,07\%$$

Muestra 3:

$$\% \text{ humedad} = (29,00 \text{ g} - 26,00 \text{ g}) / (26,00 \text{ g}) \times 100$$

(3)

$$\% \text{ humedad} = 10,34\%$$

Muestra 4:

$$\% \text{ humedad} = (30,00 \text{ g} - 26,50 \text{ g}) / (26,50 \text{ g}) \times 100$$

(4)

$$\% \text{ humedad} = 11,67\%$$

En la realización de esta prueba, se pudo constatar que los envases biodegradables tienen una resistencia mecánica adecuada, lo que valida la eficacia del proceso de fabricación y la elección de los materiales utilizados.

TABLA VII
RESULTADO DE LA PRUEBA DE PUNTO DE QUIEBRE

Tratamiento	Muestra	Escala de Valoración				
		1	2	3	4	5
Cascarilla de café al 50%, Almidón de maíz al 30% y glicerina al 20%	1	X				
	2		X			
	3	X				
	4	X		X		

A continuación, se detallan las asignaciones cuantitativas del estado de los envases biodegradables después de las pruebas de vibración y contacto crítico y su descripción cualitativa de cada asignación.

TABLA VIII
DESCRIPCIÓN DEL VALOR PARA LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA VIBRACIÓN Y CONTACTO CRÍTICO

Leyenda	
Porcentaje de valoración	Descripción cualitativa
100%	Representa ningún daño en la integridad física en los envases biodegradables

TABLA IX
DESCRIPCIÓN DE LA ESCALA DE VALOR (RESISTENCIA A LA VIBRACIÓN)

85%	Representa desprendimiento leve de partículas pequeñas de material en los envases biodegradables.
55%	Representa desprendimiento moderado de partículas medianas de material y/o agrietamientos superficiales en los envases biodegradables.
35%	Representa desprendimiento leve de partículas grandes de material y/o agrietamientos profundizados en los envases biodegradables.
25%	Representa deterioro casi total y/o agrietamientos totales en la integridad física de los envases biodegradables.

B. Del contenido de ceniza y humedad del diseño del prototipo de envase biodegradable

Para aprovechar este residuo orgánico seco, es fundamental conocer el comportamiento de las propiedades físicas y químicas de la cascarilla de café. Las características de la cascarilla determinarán el tipo de subproducto que se puede generar, en este caso, el diseño del prototipo del envase biodegradable.

Se tomaron 5 g de muestra en seco, las cuales fueron analizadas por duplicado. Las muestras se llevaron a la mufla durante dos horas a una temperatura de 500°C para determinar su comportamiento y obtener los resultados correspondientes.

TABLA X
RESULTADOS DEL CONTENIDO DE CENIZA EN SECO

Muestra	Muestra 1	Muestra 2	% de ceniza
Peso Inicial	5,7 g	5,18 g	5,8
Peso Final	3,00 g	2,24 g	4,3
Promedio		5,05%	
Varianza		1,13	
Desviación Estándar		1,06	
Coficiente de varianza		0,21	

El valor promedio obtenido entre las dos muestras fue de 5,05% ±. Este valor se debe a que el material estudiado experimentó cambios químicos que incrementaron la disponibilidad de los minerales presentes durante el tiempo de almacenamiento. En este estudio, se observó un aumento en el contenido de cenizas, el cual superó el límite permitido en el café oscuro (5.82%). Todos estos cambios son resultado del proceso de tostado artesanal.

En cuanto al contenido de humedad, se determinó midiendo la pérdida de humedad en una estufa a 105°C hasta alcanzar un peso constante. Los resultados fueron expresados en porcentajes (%), como se muestra en la Tabla 10.

TABLA XI
RESULTADOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestra	% de ceniza
1	76%
2	71%
3	71%
Promedio	72%
Varianza	8,33

Desviación estándar	2,89
Coficiente de varianza	0,04

C. Diseño del prototipo del envase biodegradable

El diseño del prototipo del envase biodegradable comenzó con la selección y clasificación de la cascarilla de café, la cual fue sometida a un proceso de digestión a una temperatura de 90°C durante 1 hora y 30 minutos. Este paso fue esencial para transformar la cascarilla en un material viscoso, adecuado para la elaboración del envase. Tras la digestión, la cascarilla fue molida y homogenizada, lo que permitió obtener una masa con características específicas: la textura debía ser suave y blanda, sin escurrir líquidos, y con un olor ligeramente fermentado y un color marrón, propio de la materia prima utilizada.

Posteriormente, se procedió a realizar un prensado manual de la masa para eliminar el agua sobrante y obtener un material más seco. Este paso es clave para mejorar la manejabilidad y la consistencia del material en su estado final. Después del prensado, la mezcla fue transferida a un molde donde se aplicó presión manual para darle la forma deseada. Finalmente, el envase moldeado fue retirado y dejado a secar a temperatura ambiente durante 5 días, completando así la fabricación del prototipo de envase biodegradable a base de cascarilla de café. Este proceso no solo permite aprovechar un residuo agrícola, sino que también proporciona un producto final con propiedades biodegradables, contribuyendo a la sostenibilidad en la producción de envases.

D. Perfil de la dureza TPA

El perfil de dureza TPA (Texture Profile Analysis) se enfoca en la evaluación de la resistencia y la capacidad de compresión de los materiales, un aspecto fundamental en la caracterización de los envases biodegradables. En este contexto, las medidas relacionadas con la reducción gradual de la producción y consumo de plásticos de un solo uso pueden ser aplicadas al diseño de los envases, ya que estos materiales biodegradables representan una alternativa sostenible.

En la Tabla 12, se presentan los ciclos correspondientes a la fuerza máxima relacionada con la resistencia a la compresión del prototipo de envase biodegradable. Esta medida es crucial para determinar la capacidad del envase para soportar cargas y mantener su integridad estructural durante su uso, lo que es un factor clave en su viabilidad como sustituto de los envases plásticos convencionales.

TABLA XII
PERFIL DE DUREZA TPA

Ensayo	Dureza (N)	
	Ciclo 1	Ciclo 2
1	5,3	6,37
2	7,253	3,50
3	4	4,02
Varianza		2,25300545
Desviación estándar		1,501004147
Coficiente de varianza		0,294410542

El diseño del envase biodegradable se asoció a la norma ASTM D256-10 (2018) para evaluar la resistencia al impacto, una propiedad clave en la funcionalidad de los materiales utilizados en envases biodegradables. Sin embargo, se debe señalar que, hasta la fecha, no se ha establecido una norma específica para medir la sensibilidad a la entalla a altas tasas de deformación, especialmente en función de la energía generada por el espesor en diseños biodegradables. Esto representa una limitación en la comparación directa entre materiales plásticos convencionales y biodegradables en términos de rendimiento bajo condiciones de alta deformación.

El ensayo de resistencia al impacto permitió obtener información relevante sobre la resistencia y rigidez del prototipo biodegradable, aportando datos fundamentales para la evaluación de su desempeño en condiciones de uso real. Durante el análisis, se observó un cambio de comportamiento en el material que no es fácilmente detectable debido a la variabilidad en las dimensiones de cada muestra. Para abordar esta variabilidad, se aplicó un análisis de varianza, el cual reveló una diferencia en los valores obtenidos con un intervalo de confianza de +/- 2,2. Este valor sugiere una alta longitud del intervalo, lo que indica una notable variabilidad en los datos debido a la desviación estándar obtenida. Este comportamiento resalta la importancia de considerar la consistencia y la homogeneidad del material a lo largo de su producción, ya que la variabilidad en las características físicas puede influir en la fiabilidad del envase biodegradable.

TABLA XIII
RENDIMIENTO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ

Etapas	Peso en (g)	% Rendimiento
Peso Inicial	500	100
Peso después digestión	320	64
Peso antes de sacado del envase biodegradable	80	25
Peso después del secado	25,4	31

El prototipo obtenido demostró un rendimiento del 31% utilizando la metodología planteada, lo que indica que, en términos generales, el proceso es aceptable. Sin embargo, este resultado también subraya la importancia de analizar cada etapa del proceso para identificar áreas de mejora y lograr un rendimiento más eficiente en futuros desarrollos. Este rendimiento muestra que el diseño y la metodología utilizados han alcanzado un desempeño adecuado, pero hay margen para optimizar los resultados y acercarse a los objetivos establecidos. En cuanto a la evaluación de las características del envase biodegradable, se partió de los residuos del café, específicamente de la cascarilla (endocarpio), para obtener la celulosa mediante un procesamiento físico-químico que incluyó hidrólisis alcalina y ácida. Este enfoque permitió transformar los residuos en un material útil para la fabricación del envase biodegradable. Para llevar a cabo el estudio de manera sistemática y controlar los factores que pueden influir en el proceso, se utilizó un diseño factorial AxB de bloques completos al azar, lo cual permitió evaluar las interacciones entre las variables y obtener conclusiones más precisas sobre

las mejores condiciones para el proceso de producción del envase biodegradable.

TABLA XIV
OBTENCIÓN DE CELULOSA DE LA CÁSCARA DE CAFÉ

N°	Simbología	Descripción
1	$C_0 - h_0$	Celulosa de la cáscara (exocarpio) mediante hidrólisis alcalina.
2	$C_0 - h_1$	Celulosa de la cáscara (exocarpio) mediante hidrólisis ácida.
3	$C_1 - h_0$	Celulosa de la cáscara (endocarpio) mediante hidrólisis alcalina.
4	$C_1 - h_1$	Celulosa de cascarilla (endocarpio) mediante hidrólisis ácida.

La metodología experimental utilizada en este estudio para la extracción de celulosa se basó en dos procesos fundamentales: hidrólisis alcalina utilizando hidróxido de sodio (NaOH) e hidrólisis ácida con ácido sulfúrico (H_2SO_4). Estos métodos son ampliamente utilizados en la industria para la extracción y purificación de celulosa a partir de fuentes vegetales [20] debido a su efectividad para descomponer los componentes no celulósicos presentes en las fibras vegetales, como hemicelulosa y lignina.

La hidrólisis alcalina con NaOH es un proceso en el cual las fibras vegetales se tratan con una solución alcalina, que rompe los enlaces de la hemicelulosa y elimina la lignina, dejando atrás la celulosa como el componente principal. Este proceso no solo facilita la liberación de celulosa, sino que también mejora la solubilidad de la misma, lo que facilita su posterior procesamiento. Por otro lado, la hidrólisis ácida con H_2SO_4 se utiliza para eliminar las impurezas orgánicas restantes, favoreciendo una mayor pureza de la celulosa extraída.

El uso combinado de estos dos métodos asegura una extracción eficiente y la obtención de una celulosa de calidad, adecuada para ser utilizada en la fabricación de envases biodegradables, lo que refuerza la viabilidad del proceso y su aplicabilidad en la valorización de residuos orgánicos como la cascarilla de café. Este enfoque experimental permite obtener material de alto rendimiento, lo que es fundamental para el desarrollo de prototipos de envases que sean tanto funcionales como respetuosos con el medio ambiente.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo de envases biodegradables a partir de cascarilla de café ha mostrado ser una alternativa viable a los plásticos convencionales, con propiedades mecánicas competitivas. La mejor mezcla para la fabricación de los envases consistió en 50% cascarilla de café, 30% almidón de maíz y 20% glicerina, la cual resultó en la mayor resistencia a la flexión. Aunque el aumento de fibra mejora la rigidez, también reduce la integridad del material, lo que debe considerarse para aplicaciones que requieran mayor flexibilidad.

La muestra número 50 de cascarilla de café triturada fue la que mejor se moldeó y compactó, logrando los resultados más destacados en cuanto a resistencia al punto de fractura (2.1 Kg/cm²). Las evaluaciones de vibración y contacto crítico

revelaron una elevada integridad física de los recipientes, con un rendimiento del 88%, lo que evidencia su habilidad para resistir impactos durante el traslado.

A pesar de los avances, los envases fabricados con melaza como aglutinante no presentaron una rigidez adecuada a temperaturas frías y perdieron su resistencia a temperaturas cálidas. Se recomienda investigar nuevos aglutinantes y ajustar las proporciones de los componentes para mejorar la estabilidad térmica. Se sugiere seguir explorando la optimización de la granulometría de la cascarilla y evaluar la resistencia al agua para asegurar un rendimiento adecuado en diversas condiciones.

REFERENCIAS

- [1] A. Diggle and T. R. Walker, "Environmental and Economic Impacts of Mismanaged Plastics and Measures for Mitigation," *Environments*, vol. 9, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS9020015.
- [2] B. Sainte-Rose, Y. Pham, and W. Pavalko, "Persistency and Surface Convergence Evidenced by Two Marker Buoys in the Great Pacific Garbage Patch," *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/JMSE11010068.
- [3] Z. Huang, M. Pan, and X. Zhou, "Distribution and Solutions for Marine Debris: A Case Study on the Great Pacific Ocean Garbage Patch," *Applied and Computational Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 253–262, May 2023, doi: 10.54254/2755-2721/3/20230471.
- [4] Organización de las Naciones Unidas, "Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente." [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>
- [5] D. Thapliyal, M. Karale, V. Diwan, S. Kumra, R. K. Arya, and G. D. Verros, "Current Status of Sustainable Food Packaging Regulations: Global Perspective," *Sustainability*, vol. 16, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/SU16135554.
- [6] A. Scriosteau and M. M. Criveanu, "Green and Reserve Logistics of Packaging and Plastic Packaging Waste under the Conditions of Circular Economy at the Level of the European Union Member States," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 12, Jun. 2024, doi: 10.3390/EN17123015.
- [7] S. Schmidt and D. Laner, "The environmental performance of plastic packaging waste management in Germany: Current and future key factors," *J Ind Ecol*, vol. 27, no. 6, pp. 1447–1460, Dec. 2023, doi: 10.1111/JIEC.13411.
- [8] SWI swissinfo, "Crean en Japón un plástico biodegradable apto para la producción industrial a gran escala," SWI swissinfo. [Online]. Available: <https://www.swissinfo.ch/spa/crean-en-jap%C3%B3n-un-pl%C3%A1stico-biodegradable-apt%C3%B3-para-la-producci%C3%B3n-industrial-a-gran-escala/75462889>
- [9] M. A. Morales, A. Maranon, C. Hernandez, V. Michaud, and A. Porras, "Colombian Sustainability Perspective on Fused Deposition Modeling Technology: Opportunity to Develop Recycled and Biobased 3D Printing Filaments," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/POLYM15030528.
- [10] SWI swissinfo, "Entra en vigor la prohibición de bolsas plásticas y otros plásticos de un solo uso en Colombia," SWI swissinfo. [Online]. Available: <https://www.swissinfo.ch/spa/entra-en-vigor-la-prohibici%C3%B3n-de-bolsas-pl%C3%A1sticas-y-otros-pl%C3%A1sticos-de-un-solo-uso-en-colombia/83120625>
- [11] M. Frey and L. A. Cifuentes, "Goodbye Plastic Bags? Lessons from the Shopping Plastic Bag Ban in Chile," *Sustainability*, vol. 16, no. 9, May 2024, doi: 10.3390/SU16093690.
- [12] Congreso de la República, "Ley N.º 30884 - Normas y documentos legales," Congreso de la República. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/1122664-30884>
- [13] N. L. Cristofoli, A. R. Lima, R. D. N. Tchoukouang, A. C. Quintino, and M. C. Vieira, "Advances in the Food Packaging Production from Agri-Food

Waste and By-Products: Market Trends for a Sustainable Development,” *Sustainability*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/SU15076153.

[14] A. Visco *et al.*, “Agri-Food Wastes for Bioplastics: European Prospective on Possible Applications in Their Second Life for a Circular Economy,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/POLYM14132752.

[15] Y. P. Situmeang, I. D. N. Sudita, I. K. Swedi, S. Nahak, H. Rematwa, and N. L. P. S. D. Damayanti, “Enhancing the Value of Coffee Husks as Organic Fertilizer in Windu Sari Farming Group, Batukaang Village, Kintamani Bangli,” *AJARCDE (Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment)*, pp. 119–123, Nov. 2023, doi: 10.29165/AJARCDE.V7I3.342.

[16] N. Ungureanu, V. Vlăduț, and S. Ștefan Biriș, “Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing,” *Sustainability*, vol. 14, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/SU141711089.

[17] J. D. Hernández-Varela and D. I. Medina, “Revalorization of Coffee Residues: Advances in the Development of Eco-Friendly Biobased Potential Food Packaging,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/POLYM15132823.

[18] F. F. Gondim, J. G. P. Rodrigues, V. O. Aguiar, M. de Fátima Vieira Marques, and S. N. Monteiro, “Biocomposites of Cellulose Isolated from Coffee Processing By-Products and Incorporation in Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) Matrix: An Overview,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 3, Feb. 2024, doi: 10.3390/POLYM16030314.

[19] S. Rizal *et al.*, “Coffee Waste Macro-Particle Enhancement in Biopolymer Materials for Edible Packaging,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/POLYM15020365.

[20] T. Jiang, R. Ghosh, and C. Charcosset, “Extraction, purification and applications of curcumin from plant materials-A comprehensive review,” *Trends Food Sci Technol*, vol. 112, pp. 419–430, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.TIFS.2021.04.015.