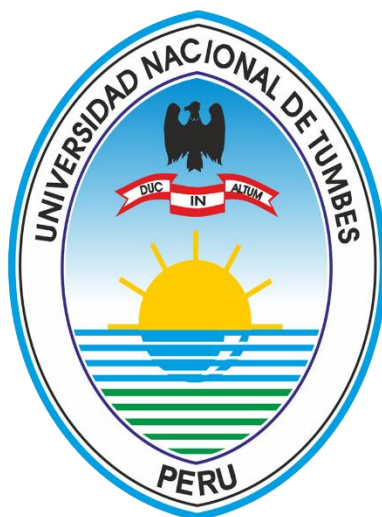


UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA DE AGROINDUSTRIAS



Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao L.*) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico

TESIS para optar por el Título profesional de Ingeniera Agroindustrial

Autora: Br. Quezada Marcelo, Maria Fernanda

TUMBES, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA DE AGROINDUSTRIAS



Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao L.*) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Ing. Carlos Alberto Cánepa La Coteria (presidente)

Mg. Ing. Frank Edwin Torres Infante (secretario)

Mg. Dorian Yasser Aguirre Campos (Vocal)

Dr. Ing. Gerardo Juan Francisco Cruz Cerro (Accesitario)

TUMBES, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA DE AGROINDUSTRIAS



Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico

Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido y forma:

Br. Quezada Marcelo Maria Fernanda (Autora)

Mg. Ing. Dorian Aguirre Campos (Asesor)

Mg. Ing. John Rimaycuna Ramirez (Co-Asesor)

TUMBES, 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
EX FUNDO FISCAL LA CRUZ-CAMPUS UNIVERSITARIO
SECRETARIA ACADÉMICA



"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL

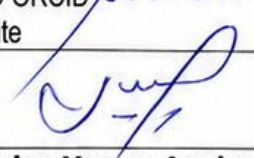
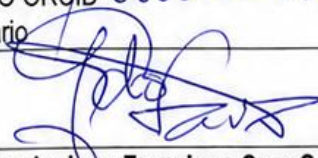
En Tumbes, a los veintidós días del mes de junio de dos mil veintiséis, siendo las 16... horas, con 45 minutos (16:45), de la Tarde, de forma presencial, se reunieron en el Aula 2 de Escuela de Posgrado, el Jurado Calificador, designado por Resolución N° 078-2023/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, **Dr. Carlos Alberto Canepa LA Coteria** (Presidente), **Mg. Frank Edwin Torres Infante** (Secretario) **Mg. Dorian Yasser Aguirre Campos**, (Vocal), reconociendo en la misma resolución además, al **Mg. Dorian Yasser Aguirre Campos**, como **Asesor** y al **Mg. John Henry Rimaycuna Ramírez**, como **Co-asesor** se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis: **"Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (Theobroma cacao L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico"**, para optar el Título Profesional de Ingeniera Agroindustrial presentado por la **Bach. Quezada Marcelo María Fernanda**, Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte de la sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo N° 75 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara a la: **Bach. QUEZADA MARCELO MARÍA FERNANDA**, por APROBADO, con el calificativo Muy Bueno.

Se hace conocer a la sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, queda para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del Título Profesional de Ingeniera Agroindustrial, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las horas y minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 22 de Junio del 2026.

 Dr. Carlos Alberto Canepa LA Coteria DNI N° CODIGO ORCID <u>0000000246151993</u> Presidente	 Mg. Frank Edwin Torres Infante DNI N° CODIGO ORCID <u>0000000346851161</u> Secretario
 Mg. Dorian Yasser Aguirre Campos DNI N° CODIGO ORCID <u>0000000198421812</u> Vocal	 Dr. Gerardo Juan Francisco Cruz Cerro DNI N° CODIGO ORCID <u>0000000160960183</u> Accesorio

C.C. - JURADOS (03) -ASESOR Y(CO)-INTERESADA-ARCHIVO (Decanato)

S. Acad.

Vocal

Fernanda Quezada Marcelo

Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (Theobroma cacao L.) en las propiedades...

 Informe Final de Tesis

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:618055125

Fecha de entrega

28 ago 2026, 11:59 GMT-5

Fecha de descarga

28 ago 2026, 12:05 GMT-5

Nombre del archivo

TESIS - Fernanda Quezada - Para Turnitin.pdf

Tamaño del archivo

7.2 MB

96 páginas

16.434 palabras

82.116 caracteres



Mg. Ing. Dorian Yasser
Aguirre Campos

Código ORCID: 0000-0001-9842-1812

5% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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



Mg. Ing. Dorian Yasser
Aguirre Campos

Código ORCID: 0000-0001-9842-1812

12	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
13	Internet	repositorio.ug.edu.ec	<1%
14	Internet	ciqa.repositorioinstitucional.mx	<1%
15	Internet	repositorio.ikiam.edu.ec	<1%
16	Internet	repositorio.uaa.mx	<1%
17	Internet	www.dspace.espol.edu.ec	<1%
18	Trabajos del estudiante	Universidad Autónoma de Bucaramanga, UNAB on 2026-08-06	<1%
19	Internet	docobook.com	<1%
20	Trabajos del estudiante	Universitat Oberta de Catalunya on 2026-03-03	<1%
21	Internet	repositorio.unbosque.edu.co	<1%
22	Internet	www.repositorio.usac.edu.gt	<1%
23	Internet	core.ac.uk	<1%
24	Internet	repositorio.uap.edu.pe	<1%
25	Internet	repositorio.unsa.edu.pe	<1%

.....

MSc. Ing. Dorian Yasser
Aguirre Campos

Código ORCID: 0000-0001-9842-1812

Fuentes principales

5%	Fuentes de Internet
1%	Publicaciones
3%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

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

1	Internet	upcommons.upc.edu	1%
2	Internet	repository.unad.edu.co	<1%
3	Internet	repositorio.uteq.edu.ec	<1%
4	Trabajos del estudiante	Universidad de Pamplona on 2024-07-23	<1%
5	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD on 2026-08-01	<1%
6	Trabajos del estudiante	uncedu on 2025-08-07	<1%
7	Internet	repositorio.espam.edu.ec	<1%
8	Trabajos del estudiante	Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo on 2024-11-06	<1%
9	Internet	www.dspace.uce.edu.ec	<1%
10	Internet	repositorio.ucsg.edu.ec	<1%
11	Trabajos del estudiante	Universidad Cesar Vallejo on 2018-03-12	<1%

Mg. Ing. Dorian Yasser
 Aguirre Campos
 Código ORCID: 0000-0001-9842-1812

26	Trabajos del estudiante	Universidad Dr. José Matías Delgado on 2016-07-25	<1%
27	Internet	dspace.esPOCH.edu.ec	<1%



Mg. Ing. Dorian Yasser
Aguirre Campos

Código ORCID: 0000-0001-9842-1812

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Quezada Marcelo Maria Fernanda con DNI 73941315 expreso que haciendo uso de las normas APA séptima edición, los resultados reportados en la presente tesis titulada “Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (Theobroma cacao L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico”, es resultado de mi trabajo constante.

Asimismo, declaro que, hasta donde tengo conocimiento, este trabajo no contiene material previamente publicado o elaborado por otra persona, salvo en los casos en que ello ha sido debidamente reconocido mediante las citas correspondientes y utilizado únicamente con fines de interpretación o comparación. En ese sentido, afirmo que toda información presentada sin referencia a terceros corresponde a mi propia autoría.

Por último, manifiesto que la redacción de esta tesis es resultado de mi esfuerzo con la dirección y apoyo de mi asesor de tesis y mis jurados calificadores, en cuanto a la concepción y expresión escrita.



Br. Quezada Marcelo Maria Fernanda
DNI: 73941315

CERTIFICACIÓN DEL ASESOR

Yo, Mg. Ing. Aguirre Campos Dorian Yasser, Docente de la Universidad Nacional de Tumbes, adscrito a la Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela profesional de Agroindustrias.

CERTIFICO:

Que, el Proyecto de Tesis: “Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico”, presentado por Br. Maria Fernanda Quezada Marcelo, ha sido asesorado y revisado por mi persona, por tanto, queda autorizado para su presentación, revisión, aprobación (inscripción) en el Repositorio de la Escuela de Agroindustrias de la Universidad Nacional de Tumbes.

Tumbes, Agosto del 2026.



Mg. Dorian Yasser Aguirre Campos
DNI: 40442207
CÓDIGO ORCID 0000-0001-9842-1812

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado a la Fernanda de 16 años que dejó su lugar natal para perseguir el sueño de acceder a una educación universitaria y convertirse en profesional. A aquella joven que, pese a las dificultades, decidió seguir adelante y confiar en todo lo que era capaz de lograr.

Asimismo, dedico este trabajo a todas las mujeres que forman parte de la ciencia y la agroindustria, quienes luchan cada día por acceder a mejores oportunidades, recibir remuneraciones justas y ser reconocidas por lo que son: investigadoras.

También, dedico este trabajo a Darwin y Carmita, por haberme brindado su apoyo durante mi etapa universitaria y abrirme las puertas de su hogar a lo largo de estos años, permitiéndome continuar mi formación profesional.

Finalmente, agradezco a Piero, por caminar conmigo durante esta etapa de crecimiento profesional y personal. Gracias por tu apoyo constante desde que inicié mi trabajo en Greenbox, por motivarme a no rendirme y por ser una luz en medio de los desafíos que implicó este camino lejos de casa.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco al Mg. Ing. John Rimaycuna Ramírez por brindarme su apoyo incondicional desde que nació mi interés por la investigación académica. Gracias por enseñarme a manejar cada equipo del laboratorio de Análisis Ambiental y por impulsar en mí la vocación de investigadora, incluso sin pertenecer a la misma escuela profesional. Por todo ello, elegirlo como mi co-asesor fue, sin duda, una de las mejores decisiones durante este proceso.

Asimismo, agradezco al Mg. Ing. Dorian Aguirre Campos, mi asesor, por acompañarme en cada etapa de la redacción y ejecución de esta tesis, por su constante apoyo en los procesos documentarios y por convertirse en una de las personas que hicieron posible culminar este proyecto.

De igual manera, expreso mi más sincero agradecimiento al Instituto de Investigación y al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Tumbes por el financiamiento otorgado para el desarrollo de esta tesis de pregrado, mediante la Resolución N° 0638-2023/UNTUMBES-R. Este apoyo me permitió ejecutar la etapa experimental de la investigación con los recursos necesarios y sin limitaciones, siendo además la primera estudiante de la universidad en acceder a este beneficio, lo que constituyó un importante impulso para alcanzar los objetivos planteados.

Agradezco también a la Escuela Profesional de Agroindustrias por formarme como una profesional orientada a la investigación y al desarrollo, y por despertar en mí la pasión por la línea de carrera a la que hoy me dedico.

ÍNDICE

RESUMEN.....	21
ABSTRACT	22
I. INTRODUCCIÓN	23
II. ESTADO DEL ARTE	26
2.1. Antecedentes	26
2.1.1. Composición lignocelulósica de la cáscara de mazorca de cacao	26
2.1.2. Métodos de extracción de biopolímeros	27
2.1.3. Aplicación de cáscara de mazorca de cacao en materiales biodegradables	28
2.1.4. Influencia de los biopolímeros sobre humedad y propiedades mecánicas y de barrera	29
2.2.1. Cacao	31
2.2.2. Polímeros en la cáscara de mazorca de cacao	32
2.2.2.1. Almidón.....	32
2.2.2.2. Celulosa	33
2.2.2.3. Lignina	34
2.2.3. Bioplástico.....	35
2.2.3.1. Características	36
2.2.3.2. Tipos de bioplástico según su composición	36
2.2.3.2.1. Bioplástico a base de almidón.....	36
2.2.3.2.2. Bioplástico a base de celulosa	37
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1. Tipo de Investigación	38
3.2. Hipótesis	38
3.3. Población y muestra.....	38
3.3.1. Población.....	38
3.3.2. Muestra	38
3.3.3. Recolección de muestra	39

3.4. Variables	40
3.4.1. Variable independiente	40
3.4.2. Variables dependientes.....	40
3.4.3. Conceptualización de variables.....	40
3.4.3.1. Bioplástico	40
3.4.3.2. Propiedades de barrera del bioplástico	40
3.4.3.3. Propiedades mecánicas del bioplástico	41
3.4.4. Operacionalización de las variables.....	41
3.5. Obtención de biopolímeros.....	42
3.5.1. Extracción de almidón de la cáscara de mazorca de cacao	42
3.5.2. Obtención de celulosa de la cáscara de cacao	43
3.5.3. Obtención de lignina de cáscara de mazorca de cacao.....	44
3.6. Preparación de bioplástico	45
3.7. Caracterización del bioplástico.....	46
3.7.1. Evaluación de propiedades de barrera.....	46
3.7.1.1. Estudio de permeabilidad de vapor de agua en bioplástico	46
3.7.1.2. Contenido de humedad del bioplástico	47
3.7.2. Evaluación de propiedades mecánicas del bioplástico	48
3.7.2.1. Prueba de elongación y tracción.....	48
3.7.2.2. Prueba de dureza.....	48
3.8. Evaluación de resultados	49
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1. Obtención de biopolímeros.....	50
4.1.1. Extracción de almidón de la cáscara de mazorca de cacao	50
4.1.2. Obtención de celulosa de la cáscara de cacao	51
4.1.3. Obtención de lignina de cáscara de mazorca de cacao.....	53
4.2. Elaboración de bioplástico.....	54
4.2.1. Evaluación de propiedades de barrera.....	57
4.2.1.1. Estudio de permeabilidad de vapor de agua en bioplástico	57

4.2.1.2.	Contenido de humedad del bioplástico	71
4.2.2.	Evaluación de propiedades mecánicas del bioplástico	72
4.2.2.1.	Resistencia de los materiales (tracción y elongación)	72
4.2.2.2.	Prueba de dureza.....	77
4.3.	Evaluación de resultados	79
4.3.1.	Permeabilidad de vapor de agua	79
4.3.2.	Humedad	80
4.3.3.	Propiedad mecánica de tracción (MPa)	81
4.3.4.	Propiedad mecánica de elongación (%)	82
4.3.5.	Propiedad mecánica de dureza (HA)	83
V.	CONCLUSIONES	85
VI.	RECOMENDACIONES	86
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
VIII.	ANEXOS	93
ANEXO 1.	OBTENCIÓN DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO	93
ANEXO 2.	OBTENCIÓN ALMIDÓN DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO	94
ANEXO 3.	OBTENCIÓN CELULOSA DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO ...	96
ANEXO 4.	OBTENCIÓN LIGNINA DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO	100
ANEXO 5.	PROCESO DE ELABORACIÓN DE BIOPLÁSTICO	102
ANEXO 6.	PRUEBAS DE PERMEABILIDAD DE VAPOR DE AGUA	104
ANEXO 7.	DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN BIOPLÁSTICOS	106
ANEXO 8.	DETERMINACIÓN DE ELONGACIÓN Y TRACCIÓN EN BIOPLÁSTICOS	107
ANEXO 9.	DETERMINACIÓN DE DUREZA EN BIOPLÁSTICOS	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de Variables	41
Tabla 2. Formulaciones del bioplástico	45
Tabla 3. Rendimientos de almidón de cáscara de mazorca de cacao (CMC)	50
Tabla 4. Rendimientos de celulosa de cáscara de mazorca de cacao (CMC)	52
Tabla 5. Rendimientos de lignina de cáscara de mazorca de cacao (CMC)	53
Tabla 6. Codificación de muestras de bioplástico	55
Tabla 7. Espesor de bioplásticos	55
Tabla 8. Incremento de peso en gramos durante 24 horas de muestras de bioplásticos	57
Tabla 9. Incremento de peso acumulado en gramos por hora de cada muestra de bioplásticos	60
Tabla 10. Resumen de los cálculos del ensayo de permeabilidad al vapor de agua en los tratamientos	68
Tabla 11. Resultados de Humedad (%) de los tratamientos mediante una termobalanza	71
Tabla 12. Resultados de tracción (MPa) de los tratamientos de bioplástico	73
Tabla 13. Resultados de elongación (%) de los tratamientos de bioplástico	73
Tabla 14. Resultados de dureza (HA) de los tratamientos de bioplástico	77
Tabla 15. Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Permeabilidad de Vapor de Agua	79
Tabla 16. Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Permeabilidad de Vapor de Agua	80
Tabla 17. Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Humedad (%)	80

Tabla 18. Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Humedad (%)	81
Tabla 19. Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Tracción (MPa)	81
Tabla 20. Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Tracción (MPa)	82
Tabla 21. Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Elongación (%)	82
Tabla 22. Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Elongación (%)	83
Tabla 23. Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Dureza (HA)	83
Tabla 24. Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Dureza (HA)	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación del cacao.....	32
Figura 2. Estructura de la amilosa.....	33
Figura 3. Estructura de la amilopectina	33
Figura 4. Estructura química de la celulosa.....	34
Figura 5. Estructura química de la lignina	35
Figura 6. Metodología experimental del proyecto de investigación.....	39
Figura 7. Gráfico de dispersión lineal de aumento de peso vs. Tiempo de tratamiento A1C1L4	63
Figura 8. Gráfico de dispersión lineal de aumento de peso vs. Tiempo de tratamiento ACL2	64
Figura 9. Gráfico de dispersión lineal de aumento de peso vs. Tiempo de tratamiento A3C1L2	65
Figura 10. Gráfico de dispersión lineal de aumento de peso vs. Tiempo de tratamiento A4C1L1	66
Figura 11. Permeabilidad de vapor de agua (WVP) en los diferentes tratamientos	69
Figura 12. Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento A1C1L4 (S- 3432)	74
Figura 13. Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento ALC2 (S-3433)74	
Figura 14. Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento A3C1L2 (S- 3434)	75
Figura 15. Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento A4C1L1 (S- 3435)	75
Figura 16. Resultados de dureza (HA) en los tratamientos	78
Figura 17. Selección de materia prima (cáscara de mazorca de cacao)	93
Figura 18 Zona Cacaotera La Palma (Papayal, Zarumilla).	93
Figura 19. Secado artesanal de cáscara de mazorca de cacao	94

Figura 20. Secado de cáscara de mazorca de cacao en estufa	94
Figura 21. Molienda de cáscara de mazorca de cacao	95
Figura 22. Almidón de cáscara de mazorca de cacao.....	95
Figura 23. Preparación de solución de NaOH 1 M.....	96
Figura 24. Preparación de solución NaOH 1M con cáscara de mazorca de cacao triturada.....	96
Figura 25. Tratamiento alcalino de NaOH y CMC a 90°C durante 4 horas en estufa.....	97
Figura 26. Lavado de celulosa alcalina	98
Figura 27. Adición de Peróxido de Hidrógeno a celulosa alcalina	98
Figura 28. Lavado de celulosa blanqueada.....	99
Figura 29. Celulosa blanqueada seca.....	99
Figura 30. Celulosa blanqueada molida y tamizada.....	99
Figura 31. Cáscara de mazorca de cacao molida en solución de Ácido Sulfúrico para hidrólisis ácida en autoclave	100
Figura 32. Lignina ácida seca	100
Figura 33. Lignina ácida molida y tamizada	101
Figura 34. Almidón, lignina y celulosa de CMC.....	102
Figura 35. Gelatinización del almidón	102
Figura 36. Adición de solución de bioplástico a molde de 20*20 cm	103
Figura 37. Bioplásticos	103
Figura 38. Pesado y ubicado de silicagel en tubos de ensayo	104
Figura 39. Tubos de ensayo en desecante para estudio de permeabilidad de vapor de agua.....	104
Figura 40. Tubos de ensayo para estudio	105
Figura 41. Registro de temperatura y HR% de cámara desecante	105
Figura 42. Medición de Humedad (%) en termobalanza.....	106
Figura 43. Mediciones de humedad (%) de los tratamientos	106

RESUMEN

La cáscara de mazorca de cacao (CMC) representa un residuo agroindustrial subutilizado con potencial significativo para la obtención de biopolímeros de valor añadido. Es por esto que el presente trabajo evaluó el efecto de las concentraciones de almidón, celulosa y lignina extraídos de CMC (*Theobroma cacao* L.) sobre las propiedades mecánicas y de barrera de bioplásticos formulados.

Se obtuvieron rendimientos promedio de 21% para fracción amilácea, 20% para celulosa (tratamiento alcalino y blanqueamiento químico con H_2O_2) y 68% para lignina (hidrólisis ácida con H_2SO_4 al 72%) y para esto, se elaboraron cuatro formulaciones (A1C1L4, ACL2, A3C1L2 y A4C1L1) variando las proporciones de estos biopolímeros, manteniendo constantes glicerol (6,80%), ácido acético (0,68%) y agua (81,63%), con espesores entre 1,5 y 2,0 mm.

Sobre la evaluación de propiedades de barrera, se determinó que el tratamiento A1C1L4 (mayor concentración de lignina) presentó la menor permeabilidad al vapor de agua ($\text{WVP} = 5,92 \times 10^{-6} \text{ g/mhPa}$), mientras que ACL2 (concentraciones iguales de celulosa y lignina) mostró la mayor permeabilidad ($\text{WVP} = 1,94 \times 10^{-5} \text{ g/mhPa}$). El contenido de humedad osciló entre 18,12% (ACL2) y 21,37% (A4C1L1), correlacionándose positivamente con el contenido de almidón.

En propiedades mecánicas, el tratamiento A4C1L1 (mayor contenido de almidón) registró los valores superiores de tracción (0,578 MPa), elongación en rotura (27,41%) y dureza Shore A (46,4 HA), mientras que el análisis ANOVA de un factor confirmó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en todas las variables evaluadas ($p < 0,05$), y la prueba Tukey HSD identificó los grupos diferenciados.

Finalmente, los resultados demuestran que la cáscara de mazorca de cacao constituye una fuente viable de biopolímeros para la elaboración de materiales biodegradables con propiedades funcionales ajustables según la aplicación objetivo.

Palabras clave: cáscara de mazorca de cacao, bioplástico, permeabilidad al vapor de agua, propiedades mecánicas, residuo agroindustrial.

ABSTRACT

Cocoa bean husks (CMC) are an underutilized agro-industrial byproduct with significant potential for the production of value-added biopolymers. For this reason, this study evaluated the effect of concentrations of starch, cellulose, and lignin extracted from CMC (*Theobroma cacao* L.) on the mechanical and barrier properties of formulated bioplastics.

Average yields of 21% were obtained for starch, 20% for cellulose (alkali treatment and chemical bleaching with H_2O_2), and 68% for lignin (acid hydrolysis with 72% H_2SO_4). Based on these results, four formulations (A1C1L4, ACL2, A3C1L2, and A4C1L1) were developed by varying the proportions of these biopolymers, while keeping glycerol (6.80%), acetic acid (0.68%), and water (81.63%) constant, with thicknesses ranging from 1.5 to 2.0 mm.

Regarding the evaluation of barrier properties, it was determined that treatment A1C1L4 (higher lignin concentration) exhibited the lowest water vapor permeability ($\text{WVP} = 5.92 \times 10^{-6}$ g/mhPa), while ACL2 (equal concentrations of cellulose and lignin) showed the highest permeability ($\text{WVP} = 1.94 \times 10^{-5}$ g/mhPa). Moisture content ranged from 18.12% (ACL2) to 21.37% (A4C1L1), correlating positively with starch content.

In terms of mechanical properties, the A4C1L1 treatment (higher starch content) recorded the highest values for tensile strength (0.578 MPa), elongation at break (27.41%), and Shore A hardness (46.4 HA), while the one-way ANOVA analysis confirmed statistically significant differences between treatments for all evaluated variables ($p < 0.05$), and the Tukey HSD test identified the distinct groups.

Finally, the results demonstrate that cocoa pod shell constitutes a viable source of biopolymers for the production of biodegradable materials with functional properties that can be adjusted according to the target application.

Keywords: cocoa pod shell, bioplastic, water vapor permeability, mechanical properties, agro-industrial waste.

I. INTRODUCCIÓN

El uso masivo de plásticos convencionales se ha incrementado considerablemente debido a las diversas propiedades funcionales que poseen y a las distintas aplicaciones que ofrecen a todas las industrias. Este material ofrece ventajas importantes como bajo costo de producción, versatilidad, capacidad de protección y conservación de productos. No obstante, su uso como material en la industria ha generado un impacto negativo significativo debido a su acumulación y degradación lenta en el ambiente. Frente a esta problemática, han surgido alternativas sostenibles de este material como los bioplásticos a partir de biopolímeros obtenidos de residuos agroindustriales (Thompson, Moore, vom Saal, & Swan, 2009).

Por otro lado, el cacao es un cultivo de alta importancia agroindustrial a nivel mundial debido a su importante demanda en el sector alimentario y MINAGRI (2026) reporta que, en el periodo 2024-2025, el total exportado mundialmente ascendió a 4 698 miles de toneladas. En el contexto nacional y la perspectiva internacional, la industria cacaotera peruana se ha vuelto muy importante frente a otras por tener el 2° puesto entre las variedades de cacao fino (Romero, 2016). Debido a ello, el cacao peruano es uno de los insumos agroindustriales con gran reconocimiento a nivel mundial por su calidad y su adaptabilidad en las industrias chocolateras más prestigiosas.

Con respecto a la producción cacaotera tumbesina, esta registró 734 Toneladas durante el 2025 para el mercado internacional (Banco Central de Reserva del Perú, 2026), donde en su mayoría se ha exportado gracias al centro de acopio ARPROCAT (Asociación Regional de Productores de Cacao – Tumbes), que envía la pasta de cacao sin procesar obtenida de los distintos productores cacaoteros artesanales al extranjero. Sin embargo, aunque su producción es importante, la industria cacaotera genera una elevada cantidad de residuos agroindustriales durante las etapas de procesamiento.

Entre estos residuos, la cáscara de mazorca de cacao (CMC) abarca el 80% del total del fruto (Villamizar & López, 2017), volviéndose un residuo con potencial de valorización debido a su alto contenido de lignocelulosa. A pesar de ello, la cáscara es destinada principalmente a la obtención de carbón o fertilizantes, aunque la difícil degradación de este residuo trae consigo un problema fitosanitario, afectando el entorno

ambiental (suelos, agua, aire) y a la población, ya que se convierte en un foco infeccioso de plagas y en un problema agrícola, siendo necesarias medidas urgentes de aprovechamiento (Gaitán & Roper, 2021).

Con este problema, es necesario brindar una alternativa ecológica de reutilización de estos desechos para reducir el impacto ambiental que pueden ocasionar, ya sea obteniendo subproductos utilizados por la misma empresa o bioplásticos que promuevan el desarrollo sostenible (Vargas & Pérez, 2018). Por esto, Ouattara *et al.* (2021) propone la recuperación de compuestos lignocelulósicos de la cáscara de mazorca de cacao para producir productos amigables con el ambiente, que generen ingresos a agricultores y promueva el desarrollo económico.

En este contexto, los bioplásticos ofrecen una alternativa de aprovechamiento sostenible que permite disminuir la dependencia del plástico convencional por las altas concentraciones de residuos que estos ocasionan, debido a que poseen características como la biodegradabilidad, propiedades mecánicas y de barrera adecuadas para determinadas aplicaciones (Cheah, et al., 2023).

En relación con los antecedentes sobre el aprovechamiento de este residuo agroindustrial, existen estudios relacionados con la caracterización de componentes y polímeros extraídos de la cáscara de mazorca de cacao; sin embargo, aún son limitados los estudios sobre la interacción entre almidón, celulosa y lignina, y su efecto sobre las propiedades mecánicas y de barrera de bioplásticos elaborados a partir de estos compuestos. Por lo tanto, esta investigación aprovechó los polímeros extraídos de la cáscara de mazorca de cacao (almidón, celulosa y lignina) para evaluar su relación en las propiedades mecánicas y de barrera de un bioplástico, con la finalidad de comprender el funcionamiento en propiedades mecánicas y de barrera con respecto a las formulaciones y generar información científica acerca de aplicaciones de este residuo en la agroindustria.

Por lo expuesto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo afectan las concentraciones de lignina, celulosa y almidón obtenidos de la cáscara de mazorca de

cacao (*Theobroma cacao L.*) en las propiedades mecánicas y de barrera de un bioplástico?

Bajo este enfoque, el trabajo de investigación se justificó en la línea de investigación de aprovechamiento de residuos agroindustriales de uno de los cultivos de importancia económica en la región Tumbes; el cacao, ayudando a reducir los focos de contaminación y plagas ocasionados por la degradación lenta de las cáscaras de mazorca de cacao en la región con su aprovechamiento para fines de investigación en innovación agroindustrial.

Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de las concentraciones del almidón, celulosa y lignina obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao L.*) en las propiedades mecánicas y de barrera de un bioplástico, con el fin de generar información científica sobre el potencial de este residuo agroindustrial.

II. ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes

La cáscara de mazorca de cacao (CMC) representa uno de los principales residuos agroindustriales generados durante el procesamiento del cacao y constituye una problemática ambiental debido a su lenta degradación y acumulación en zonas de producción (Torres M. , 2019). En este contexto, al identificar un residuo agroindustrial de difícil degradación como la cáscara de mazorca de cacao, es posible aprovechar los distintos polímeros en su composición para elaborar productos con características específicas y ser útiles en aplicaciones específicas, siendo una de estas la producción de bioplásticos con fines agroindustriales (Tapay, Compoverde, & Chinga, 2025).

2.1.1. Composición lignocelulósica de la cáscara de mazorca de cacao

En primer lugar, Herrera, *et al.* (2020) en su trabajo de investigación titulado “Extracción de almidón de cáscara de cacao *Theobroma cacao* L. como alternativa de bioprospección” menciona que la composición química de la cáscara de la mazorca de cacao permite que sea un residuo agroindustrial de complicada degradación gracias a su extenso contenido de lignina, componente que otorga propiedades de dureza a la cáscara. Con respecto al almidón, con una extracción por vía húmeda, se obtuvo $12,04 \pm 0,025\%$. Para celulosa, gracias a su obtención con la norma NTC 697, tuvo un rendimiento de $30,70 \pm 0,753\%$. Por último, para la obtención de lignina con la norma TAPPI 222 om-88, esta tuvo un rendimiento de $45,23 \pm 0,184\%$.

De manera similar, Ouattara *et al* (2021), en su artículo de investigación recopilatorio “Cocoa pod husks as potential sources of renewable high-value-added products: A review of current valorizations and future prospects” reportó contenidos de lignina de 14% a 34,82% en cáscara, celulosa con presencia entre 18,45% a 44,69% y hemicelulosa entre 8,7% a 37%. Además, los autores presentan pretratamientos para la obtención de lignina con método químico ($H_2SO_4 - NaOH$) donde el rendimiento es de 74,48%.

Otro antecedente que estudia la caracterización de la cáscara de cacao lo realizó Vivanco *et al.* (2018) con su tema “Caracterización físico-química de la cascarilla de *Theobroma cacao* L, variedades Nacional y CCN-51”, donde se obtuvo porcentajes de carbohidratos 35,24% para variedad Nacional y 26,38% para CCN-51. Para fibra, que se relaciona con celulosa y lignina, se obtuvo 41.96% en variedad Nacional y para acidez, los resultados fueron 0,14 en variedad nacional 0,115 en CCN-51.

2.1.2. Métodos de extracción de biopolímeros

Con respecto a métodos de extracción de almidón, los autores Conde y Domínguez (2021) con su trabajo de titulación “Evaluación de la eficiencia coagulante-floculante de la cáscara de cacao (CCN-51) y yuca (*Manihot esculenta*) en agua superficial: Rio Tenguel”, indican la utilización de molienda húmeda y sedimentación para obtener un porcentaje de 28,56%. Sobre el proceso de molienda, este comienza con el corte y trituración de la cáscara para luego ser sumergidas en agua y obtener el almidón por sedimentación.

Respecto a la obtención de celulosa y lignina, la autora Torres (2019) con su trabajo de titulación “Obtención de celulosa a partir de la cáscara de cacao ecuatoriano (*Theobroma cacao* L.) mediante hidrólisis térmica para la elaboración de pulpa de papel”, indica que, gracias a una serie de reacciones químicas conocidas como hidrólisis junto a un equipo de explosión de vapor en altas temperaturas, se logró obtener 33,45% de celulosa y 14,67% de lignina.

De manera similar, el artículo científico de Azmin, Hayat y Nor (2020) titulado “Development and characterization of food packaging bioplastic film from cocoa pod husk cellulose incorporated with sugarcane bagasse fibre” explica la extracción de celulosa se basó en hidrólisis alcalina para obtener la celulosa blanqueada con ayuda de reactivos como NaOH y H₂O₂.

2.1.3. Aplicación de cáscara de mazorca de cacao en materiales biodegradables

Para relacionar los biopolímeros con el bioplástico, Gaitán y Roperó (2021) en su trabajo de investigación titulado “Planteamiento de un proceso para el desarrollo de platos biodegradables a base de cascarilla de cacao”, propusieron elaborar envases biodegradables (platos) con la participación de la cáscara de cacao como componente principal, con el fin producir envases desechables que no contribuyan a la contaminación del medio ambiente. Este proyecto es importante porque utilizan el proceso de molienda, como en anteriores antecedentes para la obtención del almidón.

Asimismo, Carrillo (2022) con su trabajo de investigación titulado “Desarrollo de empaques biodegradables a partir de harina de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) para el sector productivo artesanal”, evaluó propiedades mecánicas mediante ensayos de dureza y resistencia, donde gracias a equipos especializados como un durómetro shore, se obtuvieron valores de 7 a 15,5 HD. Con respecto a la resistencia, el método trató sobre la determinación de la relación de alargamiento del bioplástico por la aplicación de fuerzas, donde los resultados obtenidos fueron de 0,167 MPa con 5,45 máximo de carga y 5,25 % de deformación, dato inferior con respecto a trabajos consultados por el trabajo de investigación, concluyendo que este tipo de material obtenido de la cascarilla de cacao no son tan resistentes como lo esperado por el alto contenido de almidón.

Por otro lado, Azmin, Hayat y Nor (2020) explica que los residuos de la cáscara de mazorca de cacao (celulosa) y bagazo de caña de azúcar (fibra) fueron utilizados para elaborar biopelículas de formulación 100:0, 75:25, 25:75, 0:100 (celulosa: fibra), donde la mejor formulación fue la de 75:25 por presentar valores bajos de absorción de agua y PVA.

2.1.4. Influencia de los biopolímeros sobre humedad y propiedades mecánicas y de barrera

Sobre la humedad de bioplástico, Lema y Manzo (2021) en su trabajo de investigación titulado “Diseño de una línea de producción de bioplásticos a partir de residuos de cacao con aplicación en envasado de alimentos”, concluyeron que los tratamientos procesados poseen una humedad desde 33,33% (contenido de celulosa) a 50% (contenido de almidón), concluyendo que mientras el contenido del almidón sea mayor, el porcentaje de humedad aumenta.

De forma similar, Otero y Figueroa (2024) en su investigación titulada “Propiedades físicas de películas comestibles de cáscaras: plátano, yuca, camote, con extracto de cacao”, elaboraron películas comestibles con extracto de cacao CCN-51 con humedades de 16,8% a 23,3%. Estos resultados son relacionados con el porcentaje de almidón, donde reportan que la tendencia de disminución de humedad se debe gracias a la interacción almidón-glicerol para reducir la absorción de agua. También, estos autores mencionan que el extracto de cacao influyó significativamente sobre la permeabilidad de agua alcanzando valores de 5,93gr/hmkPa, atribuyendo esto a la polaridad e hidrofiliidad de los componentes presentes en la matriz polimérica de CMC. Por otro lado, sobre elongación y tracción, se obtuvieron resultados de 9,85% a 22,4% y 0,74MPa a 1,75 MPa respectivamente.

En cuanto a la influencia de celulosa en las propiedades mecánicas, Cabrejos, et al., (2024) en su trabajo titulado “Caracterización de las propiedades mecánicas del bioplástico de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y compuestos celulósicos de café (*Coffea arabica* L.)” concluye que el incremento de celulosa en las formulaciones favorecen la resistencia a la tracción; sin embargo, disminuyó la elongación del material lo que pone en evidencia que la incorporación de compuestos lignocelulósicos aumenta la rigidez estructural matricial del bioplástico. Sobre los resultados de tracción y elongación, el tratamiento con menor tracción fue el que estaba compuesto por 9% almidón y 2% celulosa, mientras que el mayor fue formulado por 15% almidón y 6% celulosa, concluyendo que la concentración de almidón favorece a esta característica.

Por otro lado, el trabajo de investigación titulado “Propiedades mecánicas, físicas y características microbiológicas en películas biodegradables obtenidas a partir de almidón modificado de papa Canchan y glicerina”, realizado por Pérez Yban (2021), evaluó el comportamiento de biopelículas compuestas por almidón modificado (oxidación NaOCl_2) de papa y glicerina en distintas concentraciones, concluyendo que el tratamiento con la menor concentración de glicerina es más resistente a la ruptura y que el que posee mayor concentración de glicerina posee mayor valor en el alargamiento de la película. Sobre la función del almidón, el tratamiento con el valor medio posee mejores resultados en la elongación del material. Sobre las propiedades de permeabilidad, la formulación de glicerina afecta directamente a las propiedades de humedad, solubilidad y PVA.

De la misma forma, Tito (2022) en su investigación titulada “Desarrollo y caracterización de recubrimientos comestibles a partir de residuos de la cadena de beneficio de cacao (*Theobroma cacao* L.): Mazorca” reportó valores de permeabilidad de vapor de agua de $1,04\text{E}+01$ y $9,25\text{E}+00$, semejantes a los obtenidos por una película compuesta de almidón de yuca ($9,54\text{E}-02$ gr/hmkPa). También, esta autora menciona que el espesor de la película está relacionado con el valor de permeabilidad de agua; mientras mayor sea el espesor, aumenta la resistencia de transmisión de vapor de agua.

Asimismo, Villegas (2022) en su trabajo de investigación titulado “Desarrollo y caracterización de recubrimientos comestibles a partir de residuos de la cadena de beneficio de cacao (*Theobroma cacao* L.): cascarilla” concluyó que las películas a base de cáscara de mazorca de cacao junto al glicerol obtuvieron valores de 0,0132, 0,0179 y 0,0162 kg/msPa en los tratamientos CBGA, CAGB y CCGH respectivamente. A su vez, la autora indicó que una menor permeabilidad representa una mejor capacidad del bioplástico para evitar el intercambio de humedad entre el bioplástico y el ambiente, característica importante para envases alimentarios. Otro punto importante que menciona es sobre las bajas concentraciones de almidón y su impacto en la permeabilidad que aumenta junto a la interacción con el glicerol.

A pesar de los avances reportados sobre el aprovechamiento de CMC para la obtención de biopolímeros y el desarrollo de materiales biodegradables, aún existen algunos vacíos con respecto al uso de almidón, lignina y celulosa como compuestos aislados

para trabajar distintas concentraciones en la producción de un bioplástico y su influencia en las propiedades de barrera y mecánicas.

2.2. Bases teóricas-científicas

2.2.1. Cacao

Theobroma cacao L. o cacao es uno de los frutos que no ha tenido un avance significativo en un ámbito industrial y tecnológico, dado que es un fruto difícil de mantener debido a su cultivo minifundista y ser organolépticamente sensible (Batista, 2009). Este fruto pertenece a la familia Esterculiáceae y es originario de la Amazonía de Sudamérica, entre los países de Colombia, Perú y Ecuador, por lo que necesita un clima cálido para desarrollarse correctamente.

Con respecto a sus características, puede medir entre 3 a 6 metros. Su tronco es ortotrópico por lo que su primer verticilo se forma a partir de 1 metro de altura, saliendo ahí las ramas plagio trópicas o laterales (Cerrón, 2012). La raíz, por su parte, se hunde de manera vertical a la tierra y la disposición de las ramas del tallo se posicionan en la base de la hoja. Las flores son de polinización cruzada y con tendencia hermafrodita, por lo que es muy difícil que el cacao se autofecunde. (Cerrón, 2012, pág. 7)

En relación a su fruto, este se encuentra dentro de una mazorca de forma elipsoidal de 10 a 35 cm con una superficie corrugada y de color variado (amarillo a verde). En esta mazorca se encuentran entre 20 a 40 semillas de 2 a 4 cm de largo, cubiertas por mucílago. Las semillas son polimorfas, es decir que adoptan distintas formas y estas son fermentadas y secadas para obtener el ingrediente principal del chocolate (Cerrón, 2012).

En relación a sus variedades, existen 3 tipos principales; Criollo, forastero y trinatrio, siendo el mejor para la industria chocolatero el primero por su sabor fino. Sin embargo, en ámbitos de cantidad, el forastero tiene una buena adaptabilidad y es tolerante a plagas (Batista, 2009). En aspectos de la botánica (Cerrón, 2012), el cacao tiene la siguiente clasificación:

Figura 1.

Clasificación del cacao

División	Espermatofita
Clase	Angiosperma
Subclase	Dicotiledónea
Orden	Malvales
Suborden	Malvinas
Familia	Esterculiáceas
Tribu	Bitneria
Género	Theobroma
Especie	Cacao

Fuente: Batista, 2019. (Guía Técnica El Cultivo de Cacao)

2.2.2. Polímeros en la cáscara de mazorca de cacao

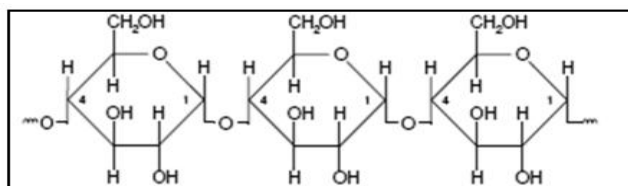
2.2.2.1. Almidón

Es un polímero natural encontrado en distintos productos provenientes de cultivos, aplicándose especialmente en la industria alimentaria. Su importancia de uso radica en otorgar cualidades particulares que modifican las características organolépticas y sensoriales de un producto, actuando como un espesante, estabilizante o como base de materiales biodegradables a partir de procesos químicos. Con respecto a su composición, la amilosa y la amilopectina son los polímeros que lo conforman, cuya proporción depende de la fuente que se extrajo el almidón (Torres Y. , 2016).

Por un lado, la amilosa es un polímero compuesto por monómeros de anhidro glucosas junto a enlaces glucosídicos α (1-4) y ramificaciones en enlaces α (1-6). “Su molécula tiene un peso molecular promedio de 105 a 106 g/mol y posee una estructura helicoidal” (León, León, Monroy, De la Espriella, & Herrera, 2020, pág. 621). En esta estructura se encuentran los átomos de hidrógeno en la parte interior, convirtiendo a este polímero en hidrófobo y permitiendo formar enlaces complejos con ácidos grasos libres, compuestos glicéridos y algunos alcoholes. También, en la parte exterior se encuentran los grupos hidroxilos (León, León, Monroy, De la Espriella, & Herrera, 2020).

Figura 2.

Estructura de la amilosa

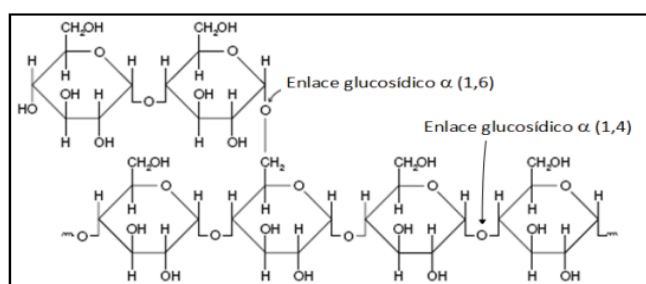


Fuente: Peñaranda, *et al*, 2008. (Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos)

Por otro lado, la amilopectina es una macromolécula conformada por cadenas unidas y que poseen enlaces glucosídicos α (1-6). Esta también contiene entre 10 a 60 unidades de glucosa y cadenas lineales de 15 a 45 unidades de glucosa. Con respecto a su peso, esta posee 1×10^7 a 5×10^8 g / mol y. En consideración a las cadenas que presenta, estas se ubican dentro del gránulo con sus extremos no reductores hacia la superficie, interactuando con zonas cristalinas y amorfas (León, León, Monroy, De la Espriella, & Herrera, 2020).

Figura 3.

Estructura de la amilopectina



Fuente: Peñaranda, *et al*, 2008. (Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos)

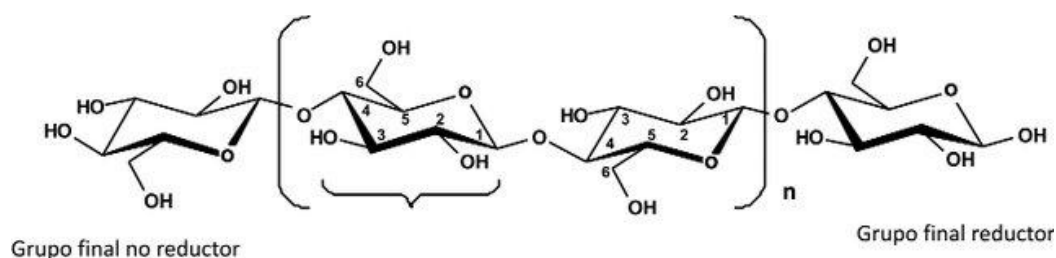
2.2.2.2. Celulosa

Es el polímero más abundante de las paredes vegetales, existiendo como fibras largas que forman una red dinámica de hemicelulosa que se encuentra incrustada. Su

composición se distribuye por enlaces covalentes de cadenas de glucano organizadas por microfibrillas y esta depende de la glucosa que se forma en la fotosíntesis de las plantas (Torres Y. , 2016).

Figura 4.

Estructura química de la celulosa



Fuente: García, *et al.*, 2013. (Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar)

En otro aspecto, la celulosa es insoluble al agua resultando estructuralmente heterogénea, tendiendo a formar enlaces intra e intermoleculares por los puentes de oxígeno y confiere regiones cristalinas amorfas ordenadas totalmente. No obstante, en estas regiones de alta cristalinidad no pueden acceder fácilmente disolventes y reactivos (Torres Y. , 2016).

2.2.2.3. Lignina

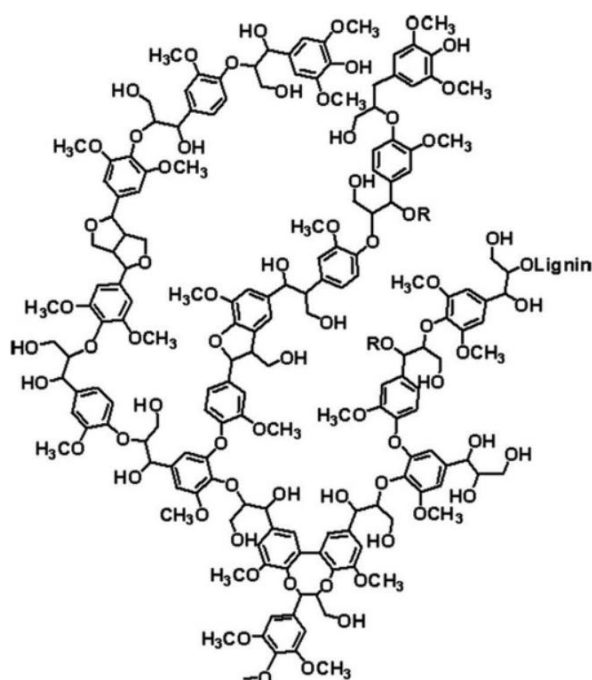
Es un polímero fenólico ramificado encargado de otorgar dureza y resistencia a la estructura de la pared vegetal, proporcionando características que se presentan en, por ejemplo, madera y fibras de tejidos leñosos. Este polímero es hidrófobo conformado por los precursores p-cumaril, coniferílico y el alcohol sinapílico (Torres Y. , 2016).

Acerca de su composición, esta depende de las características de cada material y de su método de extracción, donde los materiales lignoceluloso de bajo contenido están compuestos por de alcohol coniferílicas, pequeñas cantidades de alcohol sinapílico y trazas de alcohol p-cumarílico. En relación a los materiales lignocelulosos con alta

cantidad de lignina, por otro lado, tienen iguales cantidades de alcohol p-cumerílico y sinapílico (Torres Y. , 2016).

Figura 5.

Estructura química de la lignina



Fuente: Ribeiro, *et al.*, 2023. (3 - Lignin nanoparticle–based nanocomposite hydrogels for biomedical applications)

2.2.3. Bioplástico

Es un polímero conformado por productos vegetales como almidón, celulosa y compuestos orgánicos como la glicerina que le brinda elasticidad al producto. Este se diferencia de los plásticos convencionales por ser biodegradable, no tener compuestos derivados del petróleo y tener la capacidad de convertirse en biomasa (Pacheco, Flores, & Rodríguez, 2014).

Actualmente, este tipo de plástico representa entre 10% y 15% de la producción mundial de este material (Cheah, *et al.*, 2023), gracias a las diferentes aplicaciones que posee (sector de envasado de alimentos, electrónico, farmacéutico, cosmético, automovilístico,

etc.) y por ser considerados seguros y eco-amigables a comparación de los plásticos convencionales (Jayakumar, et al., 2023). También, la utilización de bioplásticos radica en las disminuciones de emisiones de carbono por la no fabricación de plásticos gracias a su reemplazo y por el aprovechamiento de residuos para su bioprospección (Pacheco, Flores, & Rodríguez, 2014).

Pese a ello, existen inconvenientes con respecto a la materia prima utilizada de base; se conoce que el bioplástico se elabora a partir de polímeros obtenidos de fuentes orgánicas, pero no se tiene en cuenta que estas fuentes contienen también agrotóxicos por sus tratamientos en contra de plagas o enfermedades (Pacheco, Flores, & Rodríguez, 2014). El problema, por lo tanto, radica en la posible transferencia de agrotóxicos al bioplástico obtenido.

2.2.3.1. Características

Sus características radican en los beneficios que trae utilizar este tipo de plásticos, debido a que contribuirán a reducir la huella de carbono por su proceso de elaboración fácil y por el ahorro de energía que gastará. También, es importante resaltar su característica de composición ya que necesita de polímeros naturales-vegetales, minimizando el uso de derivados de petróleo y aditivos sintéticos contaminantes. Finalmente, este tipo de plástico se caracteriza por su fácil degradación, ya que su composición lo vuelve apto para degradarse en menos tiempo que plásticos convencionales, formando una biomasa que puede ser aprovechada por los suelos (Pizá, et al, 2017).

2.2.3.2. Tipos de bioplástico según su composición

2.2.3.2.1. Bioplástico a base de almidón

El almidón es una fuente renovable vegetal que lo producen los alimentos amiláceos, compuestos por polímeros como amilosa y amilopectina en forma de gránulos. Esta forma favorece que la capacidad de disolución en agua, por lo que es común que el almidón se refuerce con plastificantes (Robyt, 2008). En la industria alimentaria, ya es

utilizado como empaques y envases para contrarrestar el uso de plásticos desmedido junto con la fomentación de aprovechamiento de residuos amiláceos (Jayakumar, Radoor, Siengchin, Shin, & Kim, 2023).

Sobre la adición de plastificantes, existen varios estudios como el de Ferreira-Santana et al., (2018) que demuestran que los bioplásticos con almidón poseen mejores propiedades mecánicas como la tracción si es que se añade en su composición plastificantes, ya que pueden modificar y reducir el contacto entre polímeros que mejorará la deformabilidad sin provocar una ruptura.

2.2.3.2.2. Bioplástico a base de celulosa

La celulosa es un polímero insoluble al agua que se encuentra en fibras vegetales como madera y algunas cáscaras. Sobre su participación en los bioplásticos, este polímero brinda a estas unas excelentes propiedades mecánicas como la flexibilidad, contando con el beneficio de ser biodegradable y biocompatible. Sobre la estructura molecular del biopolímero, sus grupos hidroxilo permiten el enlace de hidrógenos a compuestos cercanos, permitiendo la cristalización (Jayakumar, Radoor, Siengchin, Shin, & Kim, 2023).

En la industria, la celulosa juega un rol importante en el proceso de papel y en empaques biodegradables, siendo el estudio de Azmin, Hayat y Nor (2020) el más representativo, dado que estos manifiestan que, la celulosa y fibra extraída de la cáscara de mazorca de cacao con el bagazo de azúcar permite que se mejoren las propiedades de vapor de agua y siendo un excelente reemplazo para material de envasado de alimentos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de Investigación

El estudio presentado es experimental y aplicado, donde se emplearon los biopolímeros de la cáscara de mazorca de cacao para elaborar un bioplástico con la finalidad de aprovechar este residuo agroindustrial que abunda en la región Tumbes. Los parámetros considerados en esta investigación son, por lo tanto, las propiedades mecánicas y de barrera del bioplástico que dependerán de la formulación del bioplástico.

3.2. Hipótesis

Las diferentes concentraciones de almidón, celulosa y lignina obtenidas de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) influyen significativamente sobre las propiedades mecánicas y de barrera del bioplástico.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población fue constituida por los desechos de la cáscara de mazorca de cacao ubicados en zonas cacaoteras de La Palma, generados por ARPROCAT y pequeños productores, siendo recolectados 40 kg.

3.3.2. Muestra

La muestra experimental, por su parte, son los tratamientos por triplicado de acuerdo a los porcentajes de almidón, celulosa y lignina presente en el bioplástico a evaluar.

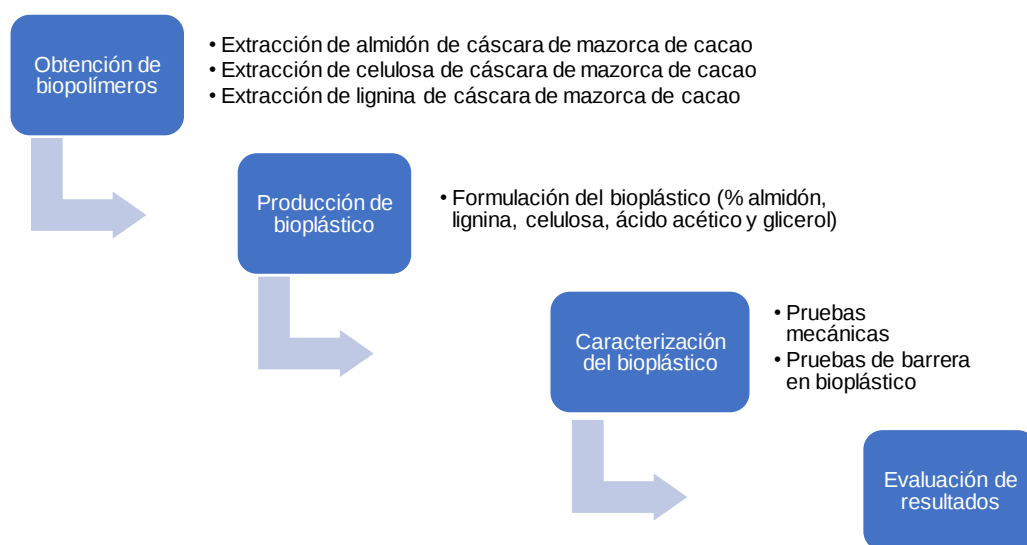
3.3.3. Recolección de muestra

Las muestras fueron recogidas de las zonas cacaoteras de La Palma y transportadas a las instalaciones del laboratorio de Agroindustrias en la Universidad Nacional de Tumbes en sacos. Estas muestras fueron limpiadas, cortadas en trozos pequeños y pasaron por diversos procesos para que los polímeros presentes en su composición sean extraídos.

Para realizar este trabajo de investigación, se dividió en 3 fases de experimentación. La primera fase consistió en los distintos procesos para obtener los biopolímeros necesarios para investigación (almidón, celulosa y lignina). Posteriormente, la segunda fase estuvo conformada por la elaboración del bioplástico con los biopolímeros extraídos y un agente plastificante: glicerol. Esta fase se ejecutó gracias a la metodología empleada por Avellán, *et al* (2020), Ruiloba, *et al* (2018), Jiménez (2017) y Niño, *et al* (2018). Cada una de estas formulaciones tuvo 3 muestras destinadas para resultados en estudios de caracterizaciones. Con la respecto a la última fase, esta se basó en los resultados de los estudios para la caracterización del bioplástico obtenido con respecto propiedades mecánicas y de barrera, agregándose una fase adicional para la evaluación de resultados.

Figura 6.

Metodología experimental del proyecto de investigación



3.4. Variables

3.4.1. Variable independiente

Formulación del bioplástico en función de las concentraciones de almidón, celulosa y lignina.

3.4.2. Variables dependientes

Propiedades de mecánicas y de barrera del bioplástico.

3.4.3. Conceptualización de variables

3.4.3.1. Bioplástico

Pertenece a la variedad de plásticos elaborado a partir de materias orgánicas que son más fáciles de degradar y formar biomasa por acción de microorganismos del ambiente. Con respecto a su composición, los polímeros naturales son los que toman protagonismo gracias a sus propiedades hidrocoloides y adición de plastificantes, pudiendo fácilmente reemplazar al plástico convencional (Pizá, Rolando, Ramirez, Villanueva, & Zapata, 2017).

3.4.3.2. Propiedades de barrera del bioplástico

Las propiedades de barrera de un bioplástico constan principalmente en su capacidad de admitir que un fluido lo traspase sin alterar su estructura, afirmándose que un material es permeable si el fluido pasa por este y que es impermeable cuando no puede pasar el fluido o es despreciable, convirtiéndose en una barrera (Huaracha, 2016). Por lo tanto, esta propiedad “evalúa la cantidad de vapor en gramos que pasa por una superficie (m^2) de un material con un espesor en milímetros por unidad de tiempo (h) cuando entre sus paredes tiene una diferencia de presión (Pa)” (Huaracha, 2016).

Por su parte, los polímeros como el almidón, celulosa y lignina son capaces de actuar como barreras entre el entorno y el fruto, generando un ambiente óptimo para la fermentación. Sin embargo, estos polímeros por sí solos pueden tener un comportamiento hidrófilo, por lo que se acude a plastificantes para que no ocurra un hinchamiento del bioplástico obtenido, resultando también que la capacidad de permeabilidad se vea afectada (Huaracha, 2016).

3.4.3.3. Propiedades mecánicas del bioplástico

Estas propiedades describen como se comporta este frente a distintos ambientes donde la elongación, tracción y dureza son los aspectos a evaluar. Para los plásticos, por su parte, tienden a ser evaluados por distintos ensayos dados por ASTM D882 (mide la resistencia a la deformación del plástico) o la norma ISO 868:2003 (evalúa el plástico a esfuerzos externos) (Holguin, 2019).

3.4.4. Operacionalización de las variables

Tabla 1.

Operacionalización de las variables

OBJETIVOS	VARIABLES	PARÁMETRO	MÉTODO	UNIDADES
Concentraciones de almidón, lignina y celulosa.	% almidón, lignina, celulosa y ácido acético y glicerol	Porcentajes de la formulación	Formulaciones	Porcentaje (%)
Evaluar las Propiedades de barrera del bioplástico.	Características de barrera del bioplástico	Estudio de Permeabilidad de Vapor de Agua (PVA) en el bioplástico	Técnica gravimétrica ASTM E-96-00	Factor de resistencia a la difusión de vapor (gr/mhPa)
		Humedad	Determinación de humedad por termobalanza	Porcentaje (%)

Evaluar las Propiedades mecánicas del bioplástico.	Características mecánicas del bioplástico	Pruebas de elongación tracción.	de y	Norma técnica ASTM D882	Fuerza máxima de tracción (MPa)	Elongación máxima (%)
				Norma ISO 868:2003	Dureza Shore (HA)	

3.5. Obtención de biopolímeros

3.5.1. Extracción de almidón de la cáscara de mazorca de cacao

Con la metodología modificada de Conde y Domínguez (2021), se realizaron las siguientes operaciones:

- Lavado: Las cáscaras de mazorca de cacao destinadas a esta obtención se lavaron para eliminar rastros de tierra y suciedad por la recolección.
- Pre-deshidratado: Luego del lavado, las cáscaras fueron expuestas al sol por 7 días en temperaturas de 22-27 °C utilizando un deshidratador artesanal por su alto contenido de humedad inicial.
- Deshidratado: Luego del secado al sol, las cáscaras fueron pasadas a una estufa a temperaturas de 60 °C durante 24 horas con la finalidad de ejecutar la molienda de manera más eficiente.
- Molienda: Al terminar el secado secundario, las cáscaras fueron colocadas en un equipo de molienda para convertir reducir el tamaño de partícula.
- Secado adicional 1: El polvo obtenido en la operación anterior, pasó por un secado a 60°C durante 3 horas en una estufa.
- Molienda fina: El material obtenido en la operación anterior fue colocado en el equipo de molienda para reducir el tamaño de partícula del polvo.
- Secado adicional 2: El polvo fue colocado en placas Petri en una estufa a 60°C por 2 horas para reducir los niveles de humedad.
- Molienda adicional: El polvo de cáscara de cacao fue puesto en un mortero para reducir el tamaño de partícula y pasar a la siguiente operación.
- Tamizado: El polvo fue puesto en un tamiz #50 para descartar partes grandes de la cáscara de cacao sin triturar correctamente y homogenizar el polvo.

- j. Pesado: Al terminar de tamizar, se pesó el polvo para obtener el rendimiento según la ecuación 1.

$$\text{Fracción rica en almidón(\%)} = \frac{\text{peso obtenido}}{\text{peso de cáscara de mazorca de cacao}} \times 100 \quad (1)$$

Cabe resaltar que, como parte del proceso de obtención y refinación del almidón, se consideró necesario evaluar su temperatura de gelatinización, debido a su influencia directa en la formación del bioplástico y a la obtención sin vía húmeda. Inicialmente, se planteó como referencia un rango de gelatinización entre 60 °C y 80 °C; sin embargo, con el fin de verificar este comportamiento, se realizó una prueba experimental de gelatinización.

Los resultados obtenidos evidenciaron que el almidón extraído de la cáscara de mazorca de cacao presentó una temperatura de gelatinización en un rango aproximado de 88 °C a 89 °C, ajustando las condiciones del proceso posterior para asegurar la adecuada transición del almidón durante la elaboración del biopolímero.

3.5.2. Obtención de celulosa de la cáscara de cacao

Para la obtención de celulosa, se adaptó la metodología de Akinjokun *et al* (2021), Lisin *et al*, (2015) y Azmin *et al* (2020). Para esto, primero se lavaron varias veces las cáscaras de mazorca de cacao con agua destilada. Luego, estas se secaron en una estufa a 80°C por 24 horas con la finalidad de facilitar su molienda. Después, se pesó 300 g de este polvo y se sometió a tratamiento alcalino a 90°C durante 4 horas en una solución de 700 ml de NaOH (1mol/L).

Luego de 4 horas, la muestra fue lavada con agua destilada para eliminar residuos de NaOH hasta alcanzar un pH neutro. Luego, esta muestra fue filtrada por un tamiz #60, tela filtrante y papel filtro. Posteriormente, la muestra se secó durante 24 horas a 60°C en una estufa.

Después, la muestra seca pasó por un blanqueado donde se utilizó peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a 70°C por 1 hora en una placa caliente, para luego ser lavada con agua destilada con la finalidad de eliminar residuos del blanqueador y regular su pH a neutro. Finalmente, la muestra se secó en una estufa durante 18 horas a 60°C y se obtuvo una masa amarillenta que fue triturada por un mortero hasta convertirse en un polvo fino de celulosa.

Lo que se obtuvo de este conjunto de operaciones fue pulpa seca de celulosa proveniente de la cáscara de mazorca de cacao y su rendimiento fue calculado por la ecuación 2.

$$\text{celulosa obtenida (\%)} = \frac{\text{peso de celulosa obtenida}}{\text{peso seco de muestra}} \times 100 \quad (2)$$

3.5.3. Obtención de lignina de cáscara de mazorca de cacao

Para este proceso, se siguió la metodología adaptada de Jiménez (2017) e inició con el pesado de 200 gramos de cáscara de mazorca de cacao que fue secada durante 16 horas a 90°C mediante una estufa. Luego, la cáscara seca de mazorca de cacao se remojó en una solución de 400 ml de H_2SO_4 al 72% (p/p) a 30 °C por agitación constante (100 rpm) durante 2 horas. Después de esta operación, se agregó 440 ml de agua destilada, reduciendo la concentración del compuesto a 8.6% (p/p).

Esta solución fue puesta en un matraz Erlenmeyer (1 L) por 3 horas a una temperatura de 120°C en autoclave. Luego, se filtró la parte líquida con ayuda de papel filtro y la parte sólida se enjuagó 5 veces con agua destilada para luego ser secada a 60°C durante 24 horas.

Lo obtenido luego del secado se denominó lignina insoluble al ácido, y su rendimiento fue calculado gracias a la ecuación 3.

$$\text{Lignina obtenida insoluble al ácido (\%)} = \frac{\text{peso de lignina}}{\text{peso seco de muestra}} \times 100 \quad (3)$$

3.6. Preparación de bioplástico

Para la preparación de bioplástico, se tomaron de referencia los diseños experimentales de Avellán, *et al* (2020), Ruiloba, *et al* (2018), Jiménez (2017) y Niño, *et al* (2018), predominando el método de gelatinización por suspensión de los biopolímeros utilizados mezclándose por agitación magnética.

Sobre cómo se elaboraron (la formulación se encuentra en la Tabla 2), primero se mezcló el almidón con el agua destilada y se llevó al agitador magnético a 300 rpm hasta que llegue a los 45°C para agregar los demás biopolímeros. Luego de ello, se esperó a los 55-60°C para verter 1 ml de solución de ácido acético 1% con la finalidad de favorecer la dispersión homogénea de los biopolímeros y evitar una gelatinización irregular del almidón.

Con esta adición, se esperó a los 65-68°C para agregar glicerol (10ml) y se homogenizó. Luego, se esperó a que la solución llegue a los 88°C-89°C para que el almidón de CMC se gelatinice. Una vez alcanzado el punto de gelatinización, se subió los rpm a 700 para seguir homogenizando la muestra durante 3-5 minutos y se retiró del agitador para inmediatamente colocar esta solución en los moldes de 20*20 cm. Con los moldes listos, se seteó la estufa a 45°C durante 10 horas para secar el bioplástico.

Tabla 2.

Formulaciones de bioplástico

Nombre de muestra	# repeticiones	Almidón (g)	Celulosa (g)	Lignina (g)	Ácido acético (solución 1%)	Glicerol (ml)	Agua destilada (ml)
ACL2	3	12	2	2	1	10	120
A1C1L4	3	11	1	4	1	10	120
A3C1L2	3	13	1	2	1	10	120
A4C1L1	3	14	1	1	1	10	120

3.7. Caracterización del bioplástico

3.7.1. Evaluación de propiedades de barrera

3.7.1.1. Estudio de permeabilidad de vapor de agua en bioplástico

La determinación de permeabilidad se realizó mediante la técnica gravimétrica ASTM E-96-00 modificado por McHugh para la transmisión de vapor de agua (WVT) del bioplástico empleando el método desecante (Huaracha, 2016), ejecutándose por triplicado por cada muestra elaborada. Sobre la metodología, esta se basó en el trabajo de Joaqui y Villada (2013) y Huaracha (2016).

En primer lugar, se acondicionó un desecador junto a silica gel en ambiente controlado (0% HR). Posteriormente, las muestras de bioplástico, previamente cortadas en cuadrados de 2*2 cm fueron colocadas en tubos de ensayo en la parte superior como tapas y se asegurándose herméticamente con parafina. Luego, el desecador fue trasladado a una estufa a temperatura controlada de 28-30°C y 50%HR, datos que fueron controlados con un termohigrómetro.

Durante este ensayo, las muestras ingresadas en tubos se sometieron a un proceso de secado (por acción de la silica-gel) durante 24 horas. En este intervalo de tiempo, se realizaron mediciones de masa cada hora, registrando la variación de peso en función de tiempo.

A partir de estos datos, se calculó la tasa de transmisión de vapor de agua mediante la pendiente de la curva graficada para obtener el valor de permeabilidad de agua con ayuda de la ecuación 4, 5 y 6:

$$WVT = \frac{d_m}{d_t} \times \frac{1}{A} \quad (4)$$

Donde WVT es el índice de transferencia al vapor de agua, dm/dt es la diferencia de masa a través del tiempo y A es el área de la película descubierta.

Después, se calculó la permeanza del bioplástico:

$$Permeanza = \frac{WVT}{PA2 - PA1} = \frac{WVT}{S(R1 - R2)} \quad (5)$$

Donde Permeanza es igual al índice de transferencia de vapor de agua, PA2 es la presión sobre la película (kPa), PA1 es la presión interna (kPa) S es la presión de vapor de saturación a la temperatura experimental (kPa), R1 es la humedad relativa de la cámara y R2 es la humedad relativa interna del tubo de prueba.

Finalmente, se calculó la permeabilidad de vapor de agua con las unidades g mm/hm² kPa, siendo:

$$WVP = Permeanza \times \text{grosor del bioplástico} \quad (6)$$

3.7.1.2. Contenido de humedad del bioplástico

La cantidad de humedad que puede absorber el bioplástico se determinó con la metodología basada en Tirado, *et al.*, (2015) y Mettler Toledo (2015), donde se utilizó un analizador de humedad halógeno que proporciona mediciones directas sin necesidad de cálculos y no requiere tanta manipulación en comparación con la metodología tradicional de secado en horno o estufa; el análisis con esta técnica se realiza de la siguiente manera:

- a. La muestra se pesa y se calienta con un radiador infrarrojo (lámpara halógena).
- b. La pérdida de peso se registra continuamente en la memoria del equipo con temperaturas de 110°C hasta peso constante de la muestra.
- c. Una vez alcanzado este criterio el contenido de humedad se calcula automáticamente a partir de la diferencia de peso.

Cabe resaltar que estos equipos presentan una sensibilidad de 0,01% de humedad y no presenta variabilidad de la temperatura programada por ser de alta precisión.

3.7.2. Evaluación de propiedades mecánicas del bioplástico

3.7.2.1. Prueba de elongación y tracción

Esta prueba es regida por la norma ASTM D882, que indica la evaluación del material a esfuerzos externos (tracción) frente a pequeños movimientos y deformaciones que serán aplicadas por una máquina universal de doble espacio similar a una prensa. Esta máquina puede sostener el bioplástico con la aplicación de fuerzas en dos puntos, donde las mordazas que vienen en la máquina se encargarán de “imprimir” la presión. Con esta marca, se podrán realizar los estudios de tracción y compresión gracias a la presión hidráulica que ejerce la máquina (Holguin, 2019).

Las muestras trabajaron con valores de cargas aplicadas en forma longitudinal en el bioplástico y es necesario aclarar que, al no ser un material completamente elástico, no volvió a su forma original. Gracias a esto, la deformación y la tensión del bioplástico fueron evaluadas con esta norma (Holguin, 2019).

Esta prueba se realizó con un laboratorio externo (SLab) en donde la muestra de bioplástico se recortó en 10 cm de alto y 2 cm de ancho, con la finalidad de realizar correctamente la prueba. Además, la velocidad de la prueba fue de 5+/-25% mm/min y la tensión nominal fue de 0,1 mm/min (Holguin, 2019).

3.7.2.2. Prueba de dureza

La prueba de dureza o compresión es regida por la norma ISO 868:2003 y fue realizada por un laboratorio externo especializado (SLab). Para el ensayo, las muestra de bioplástico fueron acondicionadas y colocadas en una superficie plana para colocar un

durómetro SHORE, aplicando el indentador de manera perpendicular sobre la superficie de las muestras hasta obtener la lectura de dureza correspondiente (Holguin, 2019).

Esta metodología permitió determinar la resistencia superficial del bioplástico ante la deformación por penetración, relacionándose directamente con la flexibilidad o rigidez de las muestras el cual mide la dureza de la superficie de distintos materiales (Holguin, 2019).

3.8. Evaluación de resultados

Los resultados obtenidos serán evaluados por ANOVA para identificar el nivel de significancia entre cada tipo de análisis realizado y así obtener datos verídicos que reflejen el cumplimiento de la finalidad del trabajo de investigación. En caso de que ANOVA muestre diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, se realizarán pruebas post hoc (como el método de Tukey) para identificar las diferencias significativas entre ellos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención de biopolímeros

4.1.1. Extracción de almidón de la cáscara de mazorca de cacao

Gracias a la metodología adaptada de Conde y Domínguez (2021), se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.

Rendimientos de almidón de cáscara de mazorca de cacao (CMC)

Aspectos	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	Peso 5
Masa de cáscara de mazorca de cacao (g)	1352	1588	1429	1951	1214
Masa de fracción rica en almidón (g)	201	285	327	472	314
% Rendimiento	15%	18%	23%	24%	26%

Los resultados obtenidos presentaron un rendimiento promedio de $21,2 \pm 4,5\%$, valor que evidencia el potencial de este residuo como fuente aprovechable para la obtención de biopolímeros, específicamente de este producto amiláceo.

Sobre el rendimiento promedio, este guarda relación con los resultados reportados por Conde y Domínguez (2021), quienes obtuvieron 28,56% mediante la obtención de almidón por vía húmeda con cáscara de cacao CCN-551. No obstante, la diferencia de aproximadamente 8% se podría atribuir a los diferentes métodos de extracción de almidón, variedad de cacao y condiciones de secado para obtener este biopolímero.

Por otro lado, los resultados obtenidos superan a los presentados por Herrera *et al.* (2020), donde indican que el contenido de almidón por vía húmeda es de $12,04 \pm 0,025\%$. Esta diferencia de casi 10% estaría asociada a la metodología, la incorporación de múltiples etapas de secado y molienda, las cuales han favorecido a la liberación del almidón de la matriz lignocelulósica de CMC.

De la misma manera, la variabilidad observada entre los resultados obtenidos (rendimientos de 15% a 26%) evidencia que la composición de CMC no es uniforme para todos los frutos, pudiendo estar influenciada por el grado de madurez, exposición a luz solar, condiciones de cosecha y postcosecha, daño de CMC y la concentración heterogénea de almidón en este residuo, explicado por Ouattara *et al.* (2021) ya que señala que la composición bioquímica de CMC puede presentar amplias fluctuaciones dependiendo de variedad, tipo de siembra y tratamiento como residuo.

Con respecto a la temperatura de gelatinización, la referencia científica mostró un rango de 60°C a 80°C; sin embargo, en la parte experimental se observó un incremento del rango de gelatinización, lo cual podría atribuirse a las concentraciones de los biopolímeros que componen la cáscara (componentes fibrosos) que limitarían la absorción de agua y retrasarían el proceso de hinchamiento de la partícula amilácea, volviéndolo resistente ante las temperaturas usuales de gelatinización de almidones (Robyt, 2008).

Por lo tanto, la temperatura de gelatinización representó un parámetro decisivo para ajustar las condiciones térmicas del proceso de obtención de almidón y obtener resultados favorables.

4.1.2. Obtención de celulosa de la cáscara de cacao

Con la metodología adaptada de Akinjokun *et al.* (2021), Lisin *et al.* (2015) y Azmin *et al.* (2020), se obtuvieron los siguientes rendimientos:

Tabla 4.*Rendimientos de celulosa de cáscara de mazorca de cacao (CMC)*

Aspectos	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	Peso 5
Masa de muestra (g)	301	302	302	300	304
Masa de celulosa lignocelulósica obtenida (g)	61	65.2	68.4	59	55.7
% Rendimiento	20%	22%	23%	20%	18%

El rendimiento promedio de este proceso fue $20,6 \pm 1,9\%$, evidenciando que este residuo posee un contenido importante de material celulósico aprovechable para la elaboración de bioplásticos. Acerca de la variación de resultados (18% a 23%), esto se podría atribuir a las diferencias en la composición estructural de CMC, así como el conjunto de procesos para la obtención de celulosa blanqueada.

Sobre los resultados, estos son menores a los obtenidos por Torres (2019), quien obtuvo 33.45% de celulosa mediante hidrólisis térmica y explosión de vapor, indicando que los tratamientos térmicos con prolongada exposición a reactivos y temperaturas altas favorecen la obtención de este biopolímero, en comparación con la metodología que priorizó condiciones operativas más accesibles.

De la misma forma, Herrera *et al.* (2020), obtuvo un rendimiento de $30,70 \pm 0,753\%$ que, a comparación a los obtenidos en el presente trabajo, fueron mayores. Esta diferencia considerable se podría relacionar con el método de extracción utilizado normalizado para el aislamiento de la celulosa, mientras que en esta investigación se ejecutó un tratamiento alcalino y blanqueamiento oxidativo.

Cabe resaltar que el tratamiento alcalino con hidróxido de sodio desempeñó un papel fundamental para la remoción parcial de lignina y hemicelulosa presentes en CMC, permitiendo obtener celulosa con restos de lignocelulosa (García, Bordallo, Dopico, &

Cordero, 2013). Posteriormente, el blanqueado con peróxido de hidrógeno permitió reducir la concentración de compuestos colorantes y residuos lignocelulósicos para obtener un biopolímero amarillento, indicando la posible presencia de compuestos fenólicos asociados a la matriz vegetal de la cáscara.

Por lo tanto, estos resultados evidencian que la cáscara de mazorca de cacao posee potencial como fuente de compuestos celulósicos para aplicaciones en matrices biodegradables, aun utilizando metodologías de extracción con condiciones operativas moderadas.

4.1.3. Obtención de lignina de cáscara de mazorca de cacao

Con la metodología adaptada de Jiménez (2017), se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.

Rendimientos de lignina de cáscara de mazorca de cacao (CMC)

Aspectos	Peso 1	Peso 2	Peso 3
Masa de muestra	200	201	200
Masa de lignina insoluble al ácido obtenida	134	145	128.6
% Rendimiento	67%	72%	64%

Los resultados obtenidos para lignina oscilan entre 64% y 72%, con un promedio aproximado de $67,7 \pm 4,0$ %, evidenciando la alta cantidad de este biopolímero en la cáscara de mazorca de cacao, confirmando así la composición estructural y recalcitrante de este residuo debido a que la lignina constituye un polímero estructural asociado a funciones de soporte y protección.

Por un lado, los resultados obtenidos fueron superiores a los mencionados en la investigación de Herrera et al. (2020), quienes obtuvieron un rendimiento de $45,23 \pm 0,184\%$ mediante la norma TAPPI 222 om-88. Por otro lado, Ouattara et al. (2021) reportó valores similares a la investigación (74,48%) mediante la obtención de lignina por método químico con ayuda de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio. Esta metodología de extracción es similar a la trabajada en esta investigación, por lo que explicaría la similitud entre los resultados reportados. Asimismo, es importante mencionar que el tratamiento con H_2SO_4 al 72% seguido de una hidrólisis térmica en autoclave permitió romper las estructuras lignocelulósicas presentes en la cáscara para dejar como residuo una fracción rica en lignina insoluble.

Desde el punto de vista del proceso de elaboración de bioplásticos, la adición de lignina es relevante debido a sus propiedades hidrofóbicas y estructurales, las cuales ayudan a mejorar la rigidez de los tratamientos y disminuir la permeabilidad de vapor de agua (Torres Y. , 2016). Aparte de ello, gracias a su naturaleza resistente a la degradación o recalcitrante, puede aportar una potencial aplicación como agente de refuerzo estructural en las matrices biopoliméricas del bioplástico.

En conjunto, estos resultados evidencian que la cáscara de mazorca de cacao constituye una fuente importante de compuestos lignínicos con potencial aplicación en matrices biopoliméricas destinadas al desarrollo de materiales biodegradables.

4.2. Elaboración de bioplástico

Para la ejecución de este análisis, se utilizó la siguiente codificación en los bioplásticos elaborados:

Tabla 6.*Formulación y codificación de muestras de bioplástico*

Código	Almidón (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Ácido acético al 1% (%)	Glicerol (%)	Agua (%)	Total (%)
A1C1L4 - 1	7,48	0,68	2,72	0,68	6,80	81,63	100,00
A1C1L4 - 2	7,48	0,68	2,72	0,68	6,80	81,63	100,00
A1C1L4- 3	7,48	0,68	2,72	0,68	6,80	81,63	100,00
ACL2 - 1	8,16	1,36	1,36	0,68	6,80	81,63	100,00
ACL2 - 2	8,16	1,36	1,36	0,68	6,80	81,63	100,00
ACL2 - 3	8,16	1,36	1,36	0,68	6,80	81,63	100,00
A3C1L2 - 1	8,84	0,68	1,36	0,68	6,80	81,63	100,00
A3C1L2 - 2	8,84	0,68	1,36	0,68	6,80	81,63	100,00
A3C1L2 - 3	8,84	0,68	1,36	0,68	6,80	81,63	100,00
A4C1L1 - 1	9,52	0,68	0,68	0,68	6,80	81,63	100,00
A4C1L1 - 2	9,52	0,68	0,68	0,68	6,80	81,63	100,00
A4C1L1 - 3	9,52	0,68	0,68	0,68	6,80	81,6	100,00

Nota: Los porcentajes fueron calculados en función de la formulación total del bioplástico.

Tabla 7.*Espesor de bioplásticos*

Código	Espesor (mm)
A1C1L4 - 1	2
A1C1L4 - 2	2
A1C1L4- 3	1,5
ACL2 - 1	2
ACL2 - 2	2
ACL2 - 3	1,5
A3C1L2 - 1	2
A3C1L2 - 2	2
A3C1L2 - 3	1,5
A4C1L1 - 1	1,5
A4C1L1 - 2	1,5
A4C1L1 - 3	2

Las formulaciones ejecutadas permitieron evaluar el efecto de los biopolímeros de CMC en las propiedades mecánicas y de barrera del bioplástico, por lo que las variables de

glicerol, agua y ácido acético se mantuvieron constantes. No obstante, en el proceso de elaboración del bioplástico, la gelatinización del almidón ocurrió en un rango de 88-90°C, valor superior al rango reportado para almidones convencionales. Esto podría atribuirse a la presencia de lignina dentro de la formulación, compuesto que dificulta la absorción de agua y aumenta la resistencia estructural de las partículas de almidón de CMC.

Sobre las concentraciones de los biopolímeros, Lema y Manzo (2021) mencionan que el alto contenido de almidón favorece la formación de películas más homogéneas y flexibles debido a la propiedad de gelatinización de este compuesto; sin embargo, debido a su capacidad hidrofílica podría presentar una mayor humedad y permeabilidad de vapor de agua.

En cuando a la celulosa, Lema y Manzo (2021) comentan que su incorporación actúa como un refuerzo estructural de la matriz polimérica mejorando la tracción, lo que podría relacionarse con la disminución de la elongación, traduciéndose en una mayor estabilidad mecánica y menor deformación de bioplástico. Por otro lado, Azmin, *et al.* (2020) reportó que las formulaciones de películas biodegradables con mayores concentraciones de fibra y celulosa presentaron menores valores en absorción y permeabilidad de vapor de agua por convertir a la matriz polimérica en una más compacta y menos permeable, concluyendo que la interacción de este biopolímero contribuiría a mejorar las propiedades de barrera de los tratamientos.

Sobre la lignina, su efecto en el bioplástico radica en aportar mayor rigidez y menor afinidad debido a las características hidrofóbicas de este compuesto, repercutiendo directamente en el aumento de temperatura de gelatinización del almidón y disminuyendo la humedad del bioplástico a comparación de otros tratamientos con menor concentración de lignina (Lema & Manzo, 2021).

Además de ello, el uso de glicerol como plastificante favoreció la flexibilidad de las películas por su impacto directo en la disminución de fuerzas intermoleculares en la matriz polimérica, mientras que el ácido acético ayudó a estabilizar el producto durante la gelatinización del almidón y homogenización de los biopolímeros (Huaracha, 2016).

Finalmente, los espesores obtenidos entre 1,5 y 2,0 mm demostraron una relación uniforme entre el secado y moldeo del bioplástico, permitiendo comparar posteriormente entre tratamientos de acuerdo a los análisis propuestos.

4.2.1. Evaluación de propiedades de barrera

4.2.1.1. Estudio de permeabilidad de vapor de agua en bioplástico

El ensayo de permeabilidad al vapor de agua se ejecutó bajo las directivas del método desecante de la norma ASTM E96-00, haciendo uso de un desecador y silica gel previamente activada, con la finalidad de tener un sub-ambiente controlado a 28-30°C y 50% HR. Sobre las mediciones, estas se realizaron a cada hora durante 24 horas, con la finalidad de evaluar la capacidad de absorción y transferencia de vapor de agua de las muestras de bioplástico.

Tabla 8.

Incremento de peso (g) durante 24 horas de muestras de bioplásticos

	13:20	14:20	15:20	16:20	17:20	18:20	19:20	20:20
	Hora 0	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7
A1C1L4- 1	14,3706	14,3725	14,3748	14,3773	14,3775	14,3779	14,3781	14,3792
A1C1L4- 2	15,5885	15,5899	15,5908	15,5915	15,5927	15,5934	15,5939	15,5951
A1C1L4- 3	15,1821	15,1830	15,1839	15,1845	15,1852	15,1858	15,1867	15,1873
ACL2- 1	15,5156	15,5201	15,5234	15,5249	15,5266	15,5285	15,5309	15,5323
ACL2 - 2	15,8662	15,8696	15,8737	15,8782	15,8798	15,8812	15,8819	15,8826
ACL2 - 3	15,7684	15,7705	15,7734	15,7766	15,7792	15,7807	15,7824	15,7843
A3C1L2- 1	15,1713	15,1721	15,1729	15,1738	15,1745	15,1758	15,1764	15,1778
A3C1L2 - 2	15,1312	15,1323	15,1344	15,1359	15,1371	15,1383	15,1392	15,1401
A3C1L2 - 3	15,1449	15,1462	15,1471	15,1479	15,1485	15,1492	15,1501	15,1513
A4C1L1 - 1	15,2957	15,2986	15,3006	15,3016	15,3028	15,3041	15,3046	15,3053
A4C1L1- 2	15,4906	15,4928	15,4934	15,4958	15,4970	15,4987	15,4991	15,5004
A4C1L1 - 3	15,3152	15,3181	15,3203	15,3219	15,3227	15,3235	15,3242	15,3250

Tabla 8.*Incremento de peso (g) durante 24 horas de muestras de bioplásticos (continuación)*

	21:20	22:20	23:20	00:20	01:20	02:20	03:20	04:20
	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15
A1C1L4- 1	14,3798	14,3800	14,3804	14,3810	14,3813	14,3817	14,3821	14,3826
A1C1L4- 2	15,5952	15,5953	15,5961	15,5973	15,5979	15,5985	15,5989	15,5992
A1C1L4- 3	15,1876	15,1881	15,1886	15,1892	15,1898	15,1903	15,1909	15,1914
ACL2- 1	15,5336	15,5353	15,5388	15,5401	15,5418	15,5427	15,5448	15,5461
ACL2 - 2	15,8828	15,8836	15,8849	15,8862	15,8872	15,8886	15,8897	15,8939
ACL2 - 3	15,7851	15,7867	15,7884	15,7901	15,7920	15,7938	15,7954	15,7972
A3C1L2- 1	15,1789	15,1795	15,1801	15,1812	15,1825	15,1832	15,1841	15,1852
A3C1L2 - 2	15,1413	15,1425	15,1433	15,1439	15,1447	15,1455	15,1462	15,1469
A3C1L2 - 3	15,1522	15,1534	15,1545	15,1552	15,1564	15,1571	15,1585	15,1597
A4C1L1 - 1	15,3058	15,3066	15,3072	15,3075	15,3087	15,3094	15,3102	15,3109
A4C1L1- 2	15,5008	15,5015	15,5022	15,5031	15,5038	15,5046	15,5053	15,5061
A4C1L1 - 3	15,3257	15,3262	15,3269	15,3274	15,3279	15,3285	15,3299	15,3308

Tabla 8.

Incremento de peso (g) durante 24 horas de muestras de bioplásticos (continuación)

	05:20	06:20	07:20	08:20	09:20	10:20	11:20	12:20	13:20
	Hora 16	Hora 17	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
A1C1L4- 1	14,3830	14,3833	14,3835	14,3839	14,3842	14,3847	14,3849	14,3851	14,3856
A1C1L4- 2	15,5994	15,5999	15,6004	15,6010	15,6015	15,6019	15,6024	15,6029	15,6034
A1C1L4- 3	15,1920	15,1928	15,1935	15,1941	15,1948	15,1954	15,1960	15,1967	15,1972
ACL2- 1	15,5487	15,5504	15,5527	15,5534	15,5554	15,5562	15,5576	15,5581	15,5598
ACL2 - 2	15,8956	15,8973	15,8991	15,9009	15,9027	15,9045	15,9063	15,9081	15,9098
ACL2 - 3	15,7994	15,8012	15,8031	15,8046	15,8061	15,8075	15,8089	15,8107	15,8124
A3C1L2- 1	15,1869	15,1875	15,1883	15,1898	15,1907	15,1918	15,1926	15,1935	15,1944
A3C1L2 - 2	15,1476	15,1482	15,1489	15,1499	15,1508	15,1515	15,1524	15,1533	15,1541
A3C1L2 - 3	15,1606	15,1614	15,1622	15,1631	15,1640	15,1651	15,1659	15,1668	15,1679
A4C1L1 - 1	15,3114	15,3123	15,3128	15,3136	15,3141	15,3149	15,3158	15,3163	15,3172
A4C1L1- 2	15,5068	15,5074	15,5079	15,5082	15,5091	15,5098	15,5102	15,5108	15,5116
A4C1L1 - 3	15,3315	15,3321	15,3327	15,3334	15,3349	15,3354	15,3361	15,3369	15,3374

Luego de obtener todos los datos registrados en la tabla, se procedió a determinar el aumento de peso en cada muestra por hora con la ecuación 7:

$$W_a = W_f - W_i \quad (7)$$

Donde W_a es el incremento de peso de la muestra en una determinada hora, W_f es el peso del tubo en un tiempo determinado y W_i es el peso inicial del tubo.

Para el caso de la muestra A1C1L4- 1 se obtiene que, en la primera hora, el aumento de peso fue:

$$W_a = 14,3725 \text{ g} - 14,3706 \text{ g} = 0,0019 \text{ g} \quad (8)$$

De esta misma forma, se procedió con el resto de datos registrados en la siguiente tabla.

Tabla 9.

Incremento de peso acumulado (g) por hora de cada muestra de bioplásticos

	14:20	15:20	16:20	17:20	18:20	19:20	20:20	21:20	22:20
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9
A1C1L4- 1	0,0019	0,0042	0,0067	0,0069	0,0073	0,0075	0,0086	0,0092	0,0094
A1C1L4- 2	0,0014	0,0023	0,0030	0,0042	0,0049	0,0054	0,0066	0,0067	0,0068
A1C1L4- 3	0,0009	0,0018	0,0024	0,0031	0,0037	0,0046	0,0052	0,0055	0,006
ACL2 - 1	0,0045	0,0078	0,0093	0,0110	0,0129	0,0153	0,0167	0,0180	0,0197
ACL2 - 2	0,0034	0,0075	0,0120	0,0136	0,0150	0,0157	0,0164	0,0166	0,0174
ACL2 - 3	0,0021	0,0050	0,0082	0,0108	0,0123	0,0140	0,0159	0,0167	0,0183
A3C1L2- 1	0,0008	0,0016	0,0025	0,0032	0,0045	0,0051	0,0065	0,0076	0,0082
A3C1L2 - 2	0,0011	0,0032	0,0047	0,0059	0,0071	0,0080	0,0089	0,0101	0,0113
A3C1L2 - 3	0,0013	0,0022	0,0030	0,0036	0,0043	0,0052	0,0064	0,0073	0,0085
A4C1L1 - 1	0,0029	0,0049	0,0059	0,0071	0,0084	0,0089	0,0096	0,0101	0,0109
A4C1L1- 2	0,0022	0,0028	0,0052	0,0064	0,0081	0,0085	0,0098	0,0102	0,0109
A4C1L1 - 3	0,0029	0,0051	0,0067	0,0075	0,0083	0,0090	0,0098	0,0105	0,0110

Tabla 9.

Incremento de peso acumulado (g) por hora de cada muestra de bioplástico (continuación)

	23:20	00:20	01:20	02:20	03:20	04:20	05:20	06:20
	Hora 10	Hora 11	Hora 12	Hora 13	Hora 14	Hora 15	Hora 16	Hora 17
A1C1L4- 1	0,0098	0,0104	0,0107	0,0111	0,0115	0,0120	0,0124	0,0127
A1C1L4- 2	0,0076	0,0088	0,0094	0,0100	0,0104	0,0107	0,0109	0,0114
A1C1L4- 3	0,0065	0,0071	0,0077	0,0082	0,0088	0,0093	0,0099	0,0107
ACL2 - 1	0,0232	0,0245	0,0262	0,0271	0,0292	0,0305	0,0331	0,0348
ACL2 - 2	0,0187	0,0200	0,0210	0,0224	0,0235	0,0277	0,0294	0,0311
ACL2 - 3	0,0200	0,0217	0,0236	0,0254	0,0270	0,0288	0,0310	0,0328
A3C1L2- 1	0,0088	0,0099	0,0112	0,0119	0,0128	0,0139	0,0156	0,0162
A3C1L2 - 2	0,0121	0,0127	0,0135	0,0143	0,0150	0,0157	0,0164	0,0170
A3C1L2 - 3	0,0096	0,0103	0,0115	0,0122	0,0136	0,0148	0,0157	0,0165
A4C1L1 - 1	0,0115	0,0118	0,0130	0,0137	0,0145	0,0152	0,0157	0,0166
A4C1L1- 2	0,0116	0,0125	0,0132	0,0140	0,0147	0,0155	0,0162	0,0168
A4C1L1 - 3	0,0117	0,0122	0,0127	0,0133	0,0147	0,0156	0,0163	0,0169

Tabla 9.

Incremento de peso acumulado (g) por hora de cada muestra de bioplástico (continuación)

	07:20	08:20	09:20	10:20	11:20	12:20	13:20
	Hora 18	Hora 19	Hora 20	Hora 21	Hora 22	Hora 23	Hora 24
A1C1L4- 1	0,0129	0,0133	0,0136	0,0141	0,0143	0,0145	0,0150
A1C1L4- 2	0,0119	0,0125	0,0130	0,0134	0,0139	0,0144	0,0149
A1C1L4- 3	0,0114	0,0120	0,0127	0,0133	0,0139	0,0146	0,0151
ACL2 - 1	0,0371	0,0378	0,0398	0,0406	0,0420	0,0425	0,0442
ACL2 - 2	0,0329	0,0347	0,0365	0,0383	0,0401	0,0419	0,0436
ACL2 - 3	0,0347	0,0362	0,0377	0,0391	0,0405	0,0423	0,0440
A3C1L2- 1	0,0170	0,0185	0,0194	0,0205	0,0213	0,0222	0,0231
A3C1L2 - 2	0,0177	0,0187	0,0196	0,0203	0,0212	0,0221	0,0229
A3C1L2 - 3	0,0173	0,0182	0,0191	0,0202	0,0210	0,0219	0,0230
A4C1L1 - 1	0,0171	0,0179	0,0184	0,0192	0,0201	0,0206	0,0215
A4C1L1- 2	0,0173	0,0176	0,0185	0,0192	0,0196	0,0202	0,0210
A4C1L1 - 3	0,0175	0,0182	0,0197	0,0202	0,0209	0,0217	0,0222

Con estos resultados, se observó que en todas las muestras existe un incremento progresivo de peso durante las 24 horas de evaluación, lo que se traduce en una absorción continua de vapor de agua a través del bioplástico.

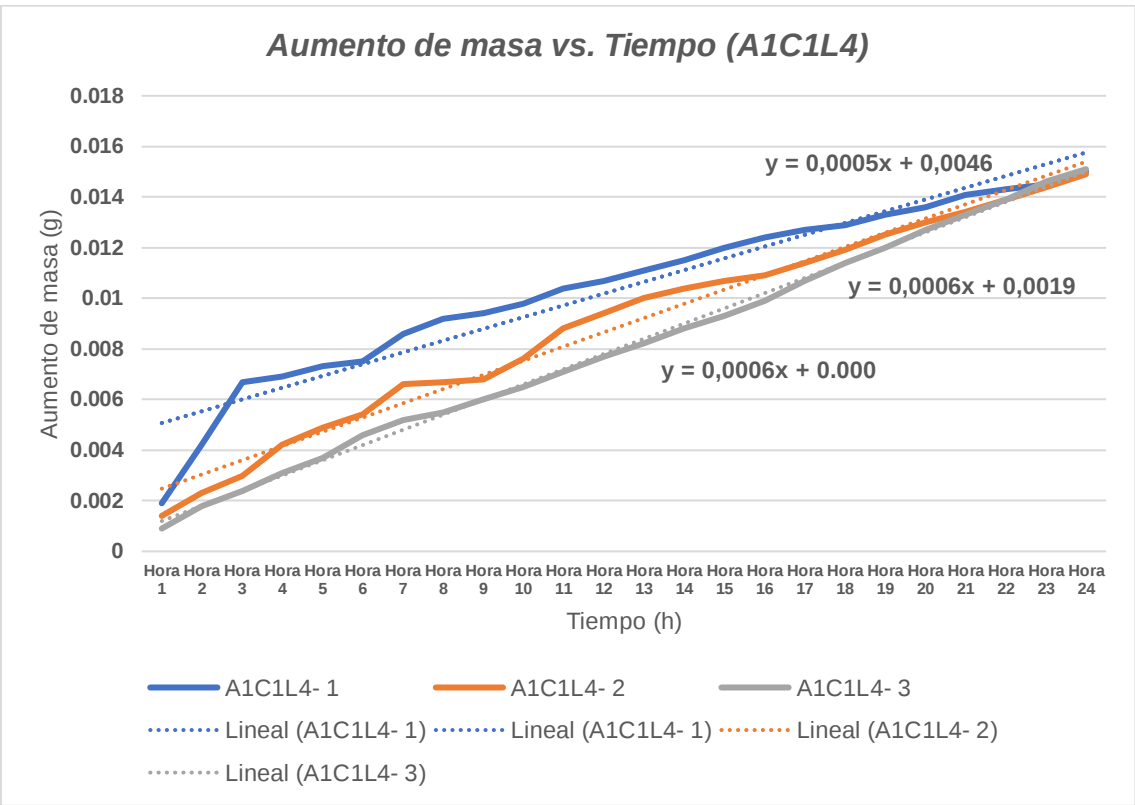
En las primeras horas del análisis, se observa un aumento más notable en el tratamiento ALC2-1, debido a que esta pasa de valores bajos a incrementos muy marcados que indica la captación de vapor de agua acelerada.

Durante el resto de horas, los tratamientos tienden a estabilizar la captación de vapor de agua, como es en el caso de A1C1L4-1 (presenta un incremento de peso más uniforme), reflejando una menor ganancia de peso durante todas las mediciones. En contraste, los tratamientos A3C1L2-1 y A4C1L1-1 muestran incrementos constantes sin variaciones marcadas, lo que permite distinguir y tener un referente para comparar muestras con captación excesiva con las que presentan un comportamiento moderado.

Por otro lado, al obtener los registros de datos de incrementos de peso, se elaboró una gráfica de dispersión lineal (aumento de peso vs. Tiempo) para calcular la pendiente de cada uno de los tratamientos.

Figura 7.

Gráfico de dispersión lineal de aumento de masa vs. Tiempo de tratamiento A1C1L4



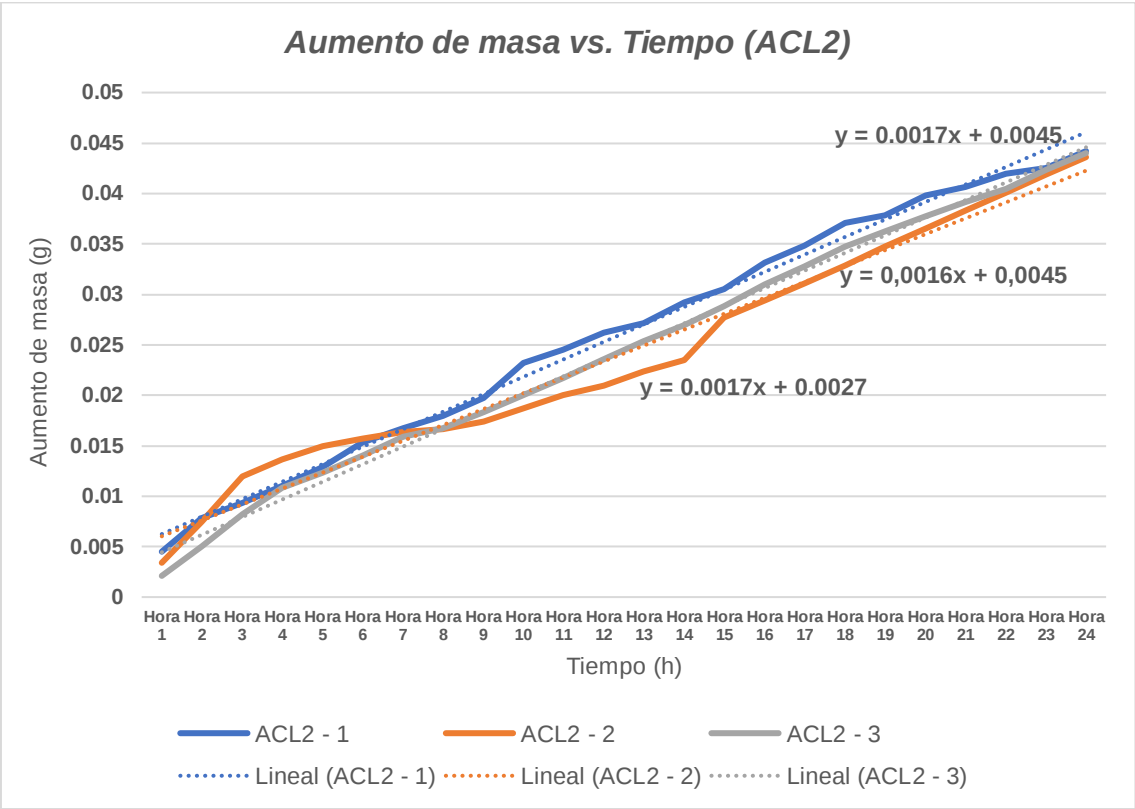
En la figura 7, se observó un incremento creciente de masa de muestras con respecto al avance del tiempo de evaluación, indicando que la muestra de bioplástico absorbió humedad de manera continua durante el tiempo del ensayo. Asimismo, en el tratamiento

A1C1L4-1, mostró una ganancia de peso superior a comparación de las otras muestras durante las primeras horas, mientras que A1C1L4-2 y A1C1L4-3 mantuvieron comportamientos similares.

De la misma forma, los cambios presentados en cada uno de los tratamientos indica que el material permitió el ingreso gradual de la humedad hacia el bioplástico evidenciándose en la pendiente positiva de cada una de las muestras, traduciendo su resultado en una posible permeabilidad de agua moderada.

Figura 8.

Gráfico de dispersión lineal de aumento de masa vs. Tiempo de tratamiento ACL2

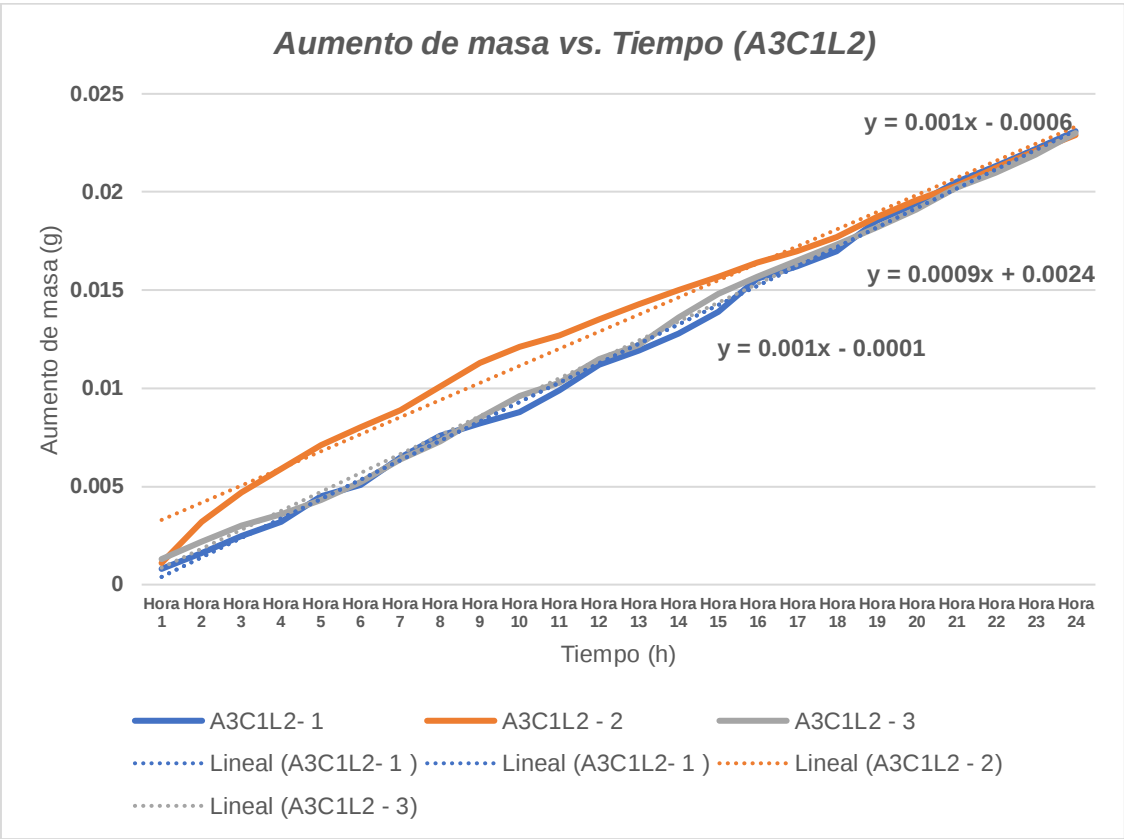


En la figura 8 del tratamiento ACL2 se observó un aumento continuo de masa de cada una de las muestras durante las 24 horas de evaluación, indicando un comportamiento estable ante la absorción de humedad y un mayor ingreso de vapor de agua hacia la matriz del bioplástico. Cabe resaltar que los valores obtenidos según masa serían los más altos de cada uno de los tratamientos, ya que las pendientes del gráfico son las

más altas entre cada una de las muestras (mayor velocidad de absorción de humedad), significando que podría reflejar valores más altos de permeabilidad de vapor de agua por ser conformada por la misma cantidad de celulosa y lignina.

Figura 9.

Gráfico de dispersión lineal de aumento de masa vs. Tiempo de tratamiento A3C1L2

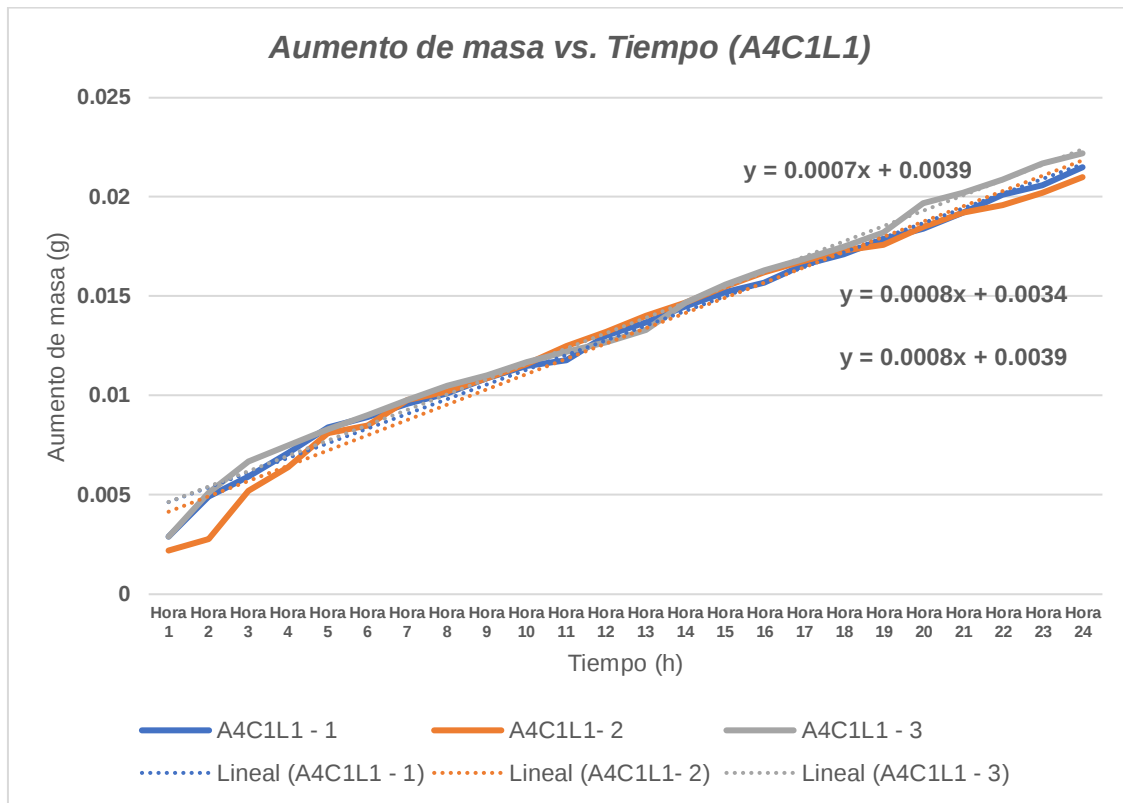


En la figura 9, las repeticiones del tratamiento A3C1L2 indican un incremento gradual uniforme de masa durante las 24 horas de evaluación, concluyendo que la permeabilidad de vapor de agua de un bioplástico formado por más almidón y lignina es moderada a comparación de las muestras.

Sobre sus pendientes, estas presentan una tendencia positiva leve sobre incremento de masa, reflejándose en un posible paso de vapor de agua controlado y sostenible debido a poseer una estructura de mayor cohesión molecular y menor espacio para la difusión de agua, característica de un cuerpo hidrofílico a base de biopolímeros vegetales.

Figura 10.

Gráfico de dispersión lineal de aumento de masa vs. Tiempo de tratamiento A4C1L1



Por último, en la figura 10, se observa un incremento progresivo y uniforme de masa durante las 24 horas de ensayo, aunque con menor intensidad a comparación de los demás tratamientos. Cabe resaltar que la estructura de este bioplástico (más almidón e igual proporción de celulosa y lignina) podría influir en la absorción de humedad más lenta y la posible interacción más controlada entre el material y vapor de agua, evidenciando la baja transferencia de humedad dentro de la matriz del bioplástico y la menor cantidad de grupos hidrofílicos disponibles para retener el agua.

Por otro lado, con la pendiente calculada, el siguiente paso fue determinar el Índice de Transferencia de Vapor de Agua (WVT). Este valor se obtuvo dividiendo la pendiente arrojada por el gráfico entre el área de la película expuesta (se utilizó tubos de ensayo de 10 mm de diámetro) y se mencionan en las ecuaciones 10, 11, 12, 13:

$$A_{\text{película}} = \pi r^2 \quad (10)$$

$$A_{\text{película}} = 3,1416 \times (5\text{mm})^2 \quad (11)$$

$$A_{película} = 78,54 \text{ mm}^2 \quad (12)$$

$$A_{película} = 7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (13)$$

Como ejemplo de cálculo, la pendiente del tratamiento A4C1L1-1 fue 0.0007 g/h fue dividida por la superficie expuesta de la película, por lo que el cálculo fue en la ecuación 14:

$$WVT = \frac{0,0007 \frac{g}{h}}{7,854 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 8,9127 \frac{g}{\text{m}^2 h} \quad (14)$$

Seguidamente, este valor (WVT), se dividió en la ecuación 15 con el dato obtenido a partir de la presión de vapor saturado del agua a 28, 29 y 30 °C (3783.1, 4009.2 y 4247 Pa, respectivamente) (Harvey, 1998) y la diferencia de humedades relativas, con el fin de determinar la permeancia (P) del material.

$$P = \frac{8,9127 \frac{g}{\text{m}^2 h}}{4013,1 \text{ Pa} (0.50 - 0)} = 4,4418 \times \frac{10^{-3} g}{\text{m}^2 h \text{ Pa}} \quad (15)$$

Luego, en la ecuación 16, la Permeancia se multiplica con el espesor del bioplástico para obtener el valor de Permeabilidad de Vapor de Agua (WVP). En el caso del tratamiento A4C1L1-1, en la tabla 7 se indica que el espesor es de 1,5 mm, por lo que se realizó el siguiente cálculo:

$$WVP = 4,4418 \times \frac{10^{-3} g}{\text{m}^2 h \text{ Pa}} \times 0,0015 \text{ m} = 6,66267 \times \frac{10^{-6} g}{\text{m h Pa}} \quad (16)$$

Con esta misma metodología, se procedió a calcular la Permeabilidad de vapor de agua de los demás tratamientos.

Tabla 10.

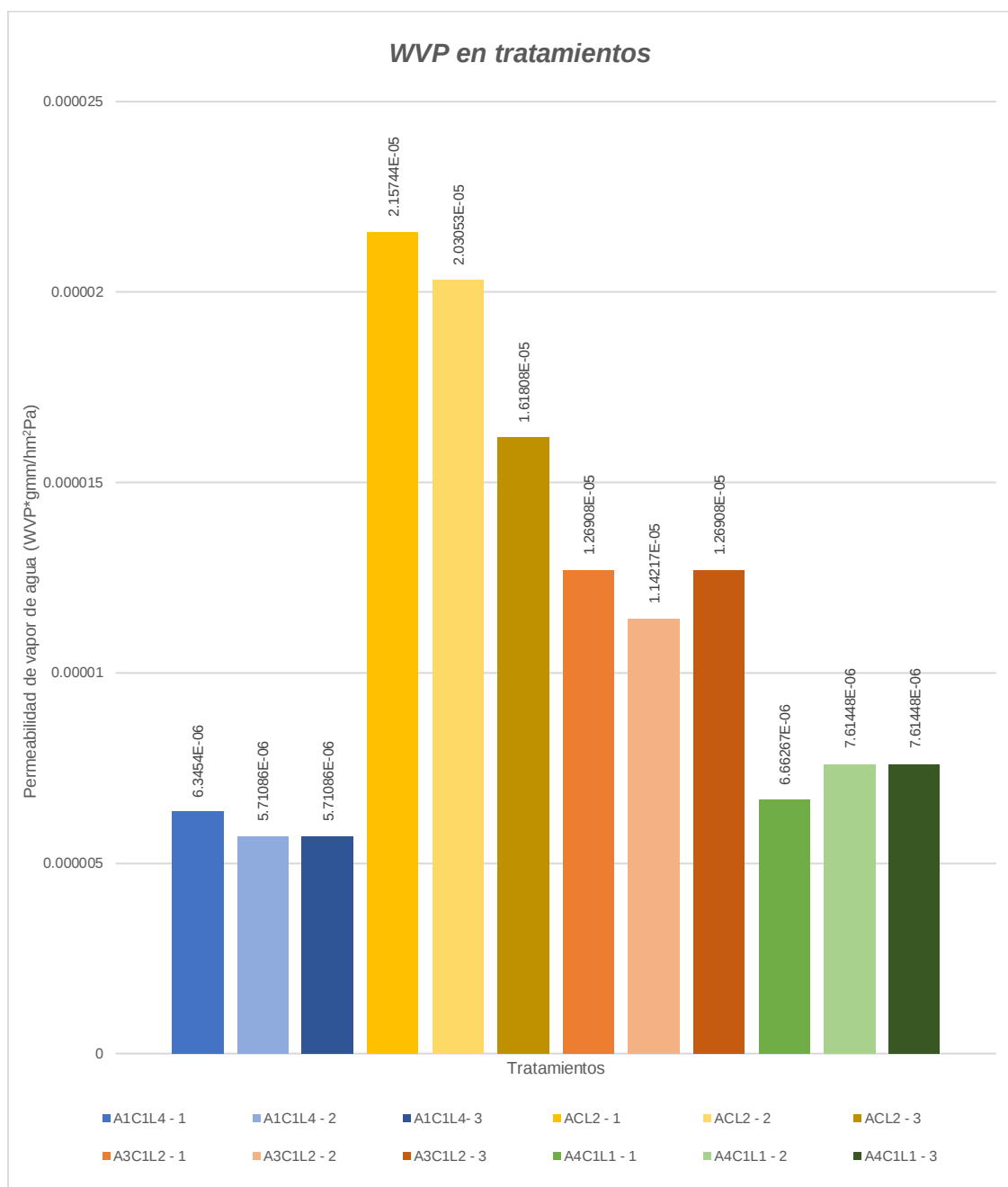
Resumen de los cálculos del ensayo de permeabilidad al vapor de agua en los tratamientos

Código	Espesor (m)	Área	Pendiente	WVT g/hm ²	Pa	HR%	Permeanza	WVP g/mhPa
A1C1L4 - 1	0,002	0,00007854	0,0005	6,3662	4013,1	0,5	0,00317	6,3454E-06
A1C1L4 - 2	0,0015	0,00007854	0,0006	7,6394	4013,1	0,5	0,00381	5,71086E-06
A1C1L4 - 3	0,0015	0,00007854	0,0006	7,6394	4013,1	0,5	0,00381	5,71086E-06
Promedio				7,2150				5,92237E-06
ACL2 - 1	0,002	0,00007854	0,0017	21,6450	4013,1	0,5	0,01079	2,15744E-05
ACL2 - 2	0,002	0,00007854	0,0016	20,3718	4013,1	0,5	0,01015	2,03053E-05
ACL2 - 3	0,0015	0,00007854	0,0017	21,6450	4013,1	0,5	0,01079	1,61808E-05
Promedio				21,2206				1,93535E-05
A3C1L2 - 1	0,002	0,00007854	0,001	12,7324	4013,1	0,5	0,00635	1,26908E-05
A3C1L2 - 2	0,002	0,00007854	0,0009	11,4591	4013,1	0,5	0,00571	1,14217E-05
A3C1L2 - 3	0,002	0,00007854	0,001	12,7324	4013,1	0,5	0,00635	1,26908E-05
Promedio				12,3080				1,22678E-05
A4C1L1 - 1	0,0015	0,00007854	0,0007	8,9127	4013,1	0,5	0,00444	6,66267E-06
A4C1L1 - 2	0,0015	0,00007854	0,0008	10,1859	4013,1	0,5	0,00508	7,61448E-06
A4C1L1 - 3	0,0015	0,00007854	0,0008	10,1859	4013,1	0,5	0,00508	7,61448E-06
Promedio				9,7615				7,29721E-06

Luego de los cálculos, se colocaron los datos de Permeabilidad de vapor de agua en un gráfico de barras para comparar los resultados.

Figura 11.

Permeabilidad de vapor de agua (WVP) en los diferentes tratamientos



Con estos datos, se identificó que los tratamientos ACL2 tuvieron valores más elevados de permeabilidad de vapor de agua a comparación del resto de muestras (promedio de 1,93535E-05 g/mhPa), lo que refleja una mayor transferencia de vapor de agua a través de su matriz polimérica (valor de WVT de 21,2206 g/hm²) y podría atribuirse a una estructura más permeable (celulosa y lignina en cantidades iguales) y con mayor afinidad por la humedad.

Por otro lado, el tratamiento A1C1L4 mostró valores más bajos de permeabilidad de agua con $5,92237\text{E-}06$ g/mhPa en promedio, evidenciando una menor transferencia de vapor de agua a través del bioplástico (valor de WVT de $7,2150$ g/hm²). Este comportamiento se podría relacionar a la concentración de lignina en su composición, volviendo al bioplástico menos permeable y con una estructura más compacta que permite una absorción de humedad más lenta y controlada, características propias de la lignina.

En el caso del tratamiento A3C1L2, los resultados de permeabilidad de vapor de agua ($1,22678\text{E-}05$ g/mhPa) se encuentran por debajo de la muestra ACL2 y superiores a A1C1L4, indicando una transferencia de vapor de agua no tan elevada (valor de WVT de $12,3080$ g/hm²) y una mejor capacidad de barrera frente a la humedad. Este resultado es respaldado por las pendientes obtenidas en el cálculo de dispersión lineal de aumento de masa vs. Tiempo de tratamiento, con valores de $0,0007$ y $0,0008$ que reflejan una absorción gradual y estable.

Por último, con el tratamiento A4C1L1, los valores de permeabilidad de vapor de agua ($7,29721\text{E-}06$ g/mhPa) son ligeramente superiores a comparación de A1C1L4 y su tasa de transmisión de vapor de agua (valor de WVT de $9,7615$ g/hm²) refleja una menor transferencia de vapor de agua y una mejor capacidad de barrera ante la humedad, siendo el resultado de aumentar el almidón en la composición del bioplástico para manifestar una absorción gradual y estable ante el vapor de agua.

En el caso de los antecedentes, Villegas (2022) obtuvo datos de $0,0132$, $0,0179$ y $0,0162$ kg/msPa en biopelículas elaboradas a partir de residuos de cacao, concluyendo que menores concentraciones de polímeros obtenido de CMC junto a la adición de glicerol representan una mejor barrera frente a la transferencia de humedad. Esto cobra sentido al identificar que la muestra A1C1L4, con menores porcentajes de almidón y celulosa posee una menor permeabilidad al vapor de agua a comparación de los otros tratamientos.

Aparte de ello, Tito (2022) menciona que el resultado de permeabilidad de vapor de agua de bioplásticos a partir de los residuos del proceso de cacao oscila entre $1,04\text{E+}01$

y $9,25\text{E}+00$ g/hmkPa, acercándose al valor de permeabilidad en biopelículas procesadas con almidón de yuca ($9,54\text{E}-02$ gr/hmkPa) que equivale a $9,54\text{E}-05$ gr/mhPa. En relación a la presente investigación, los valores obtenidos en los diferentes tratamientos se asemejan a la muestra patrón de almidón de yuca, debido que los resultados de las muestras presentan permeabilidades similares, lo que evidencia una adecuada capacidad de barrera frente al vapor de agua y humedad, siendo causados posiblemente por la interacción de los biopolímeros junto al glicerol.

4.2.1.2. Contenido de humedad del bioplástico

Gracias a la metodología basada en Tirado, *et al.*, (2015) y Mettler Toledo (2015), se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11.

Resultados de Humedad (%) de los tratamientos mediante una termobalanza

Tratamiento	Humedad (%)
A1C1L4- 1	18,3
A1C1L4- 2	18,45
A1C1L4- 3	18,25
Promedio	18,33
ACL2- 1	18,35
ACL2 - 2	17,95
ACL2 - 3	18,05
Promedio	18,12
A3C1L2- 1	20,9
A3C1L2 - 2	19,85
A3C1L2 - 3	19,95
Promedio	20,23
A4C1L1 - 1	20,80
A4C1L1- 2	21,35
A4C1L1 - 3	21,95
Promedio	21,37

Los resultados de contenido de humedad en los diferentes tratamientos presentaron valores comprendidos entre 18,12% (promedio de ACL2) y 21,37% (promedio de A4C1L1), demostrando que mientras mayor sea el contenido del almidón en el bioplástico, la humedad aumenta. En el caso de ACL2 y A1C1L4, el primer tratamiento presenta menor humedad por la mayor presencia de celulosa comparación del segundo tratamiento, reafirmando lo mencionado por Lema y Manzo (2021).

Acerca de los valores obtenidos en todos los tratamientos, los datos obtenidos se encuentran en el rango de 16,8% a 23,3% según la investigación de Otero y Figueroa (2024), atribuyendo este comportamiento a las interacciones entre almidón y glicerol presentes en la matriz del bioplástico.

No obstante, para la investigación de Lema y Manzo (2021), estos datos se encuentran por debajo de lo obtenido indicando una menor retención de agua y una estructura más compacta en todas las formulaciones. No obstante, cabe resaltar que estos autores trabajan con porcentajes de concentraciones de almidón y celulosa mayores a 10%, mientras que esta investigación presenta valores menores a 10%, factor que podría influir en la reducción del contenido de humedad a comparación de la investigación citada anteriormente.

Por lo tanto, el comportamiento de contener mayor humedad podría atribuirse al carácter hidrofílico del almidón debido a la presencia de grupos hidroxilo que son capaces de interactuar con las moléculas de agua mediante puentes de hidrógeno, favoreciendo la retención de humedad dentro de la matriz polimérica.

4.2.2. Evaluación de propiedades mecánicas del bioplástico

4.2.2.1. Resistencia de los materiales (tracción y elongación)

Esta prueba se realizó con un laboratorio externo (SLab) con la norma ASTM D882, teniendo los siguientes resultados.

Tabla 12.*Resultados de tracción (MPa) de los tratamientos de bioplástico*

Tratamiento	Código de muestra	Unidad	# de probeta	Resultado	Promedio
A1C1L4	S-3432	MPa	1	0,018	0,019
			2	0,021	
			5	0,019	
ACL2	S-3433	MPa	1	0,037	0,043
			2	0,044	
			5	0,047	
A3C1L2	S-3434	MPa	1	0,116	0,120
			2	0,122	
			5	0,121	
A4C1L1	S-3435	MPa	1	0,561	0,578
			2	0,596	
			5	0,578	

Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2658, SLab (2026).

Tabla 13.*Resultados de elongación (%) de los tratamientos de bioplástico*

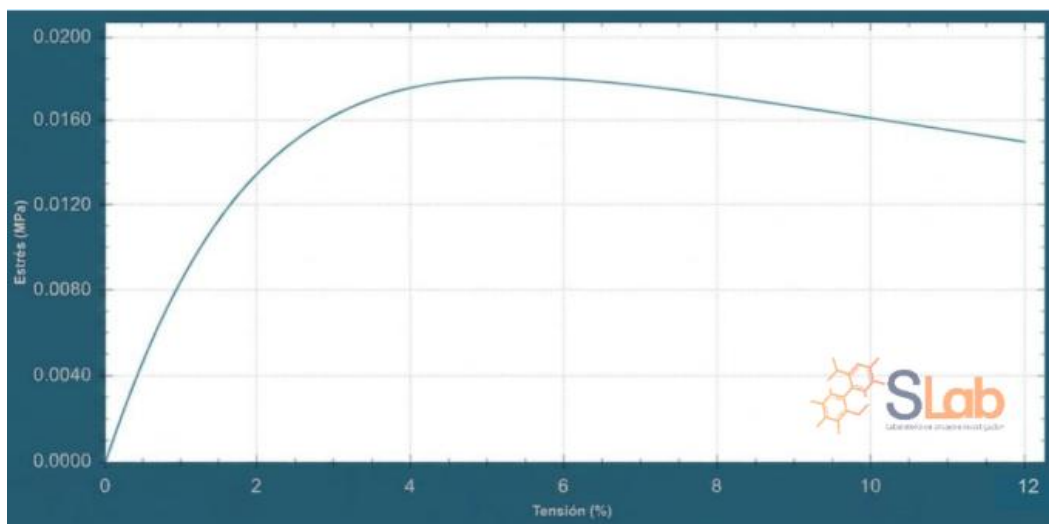
Tratamiento	Código de muestra	Unidad	# de probeta	Resultado	Promedio
A1C1L4	S-3432	%	1	5,14	5,593
			2	6,27	
			5	5,37	
ACL2	S-3433	%	1	12,63	12,283
			2	11,71	
			5	12,51	
A3C1L2	S-3434	%	1	15,14	13,467
			2	11,81	
			5	13,45	
A4C1L1	S-3435	%	1	27,39	27,407
			2	24,21	
			5	30,62	

Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2658, SLab (2026).

Con estos resultados, se graficó una curva de tensión-deformación que describe cómo los distintos tratamientos de bioplástico responden a una fuerza de tracción.

Figura 12.

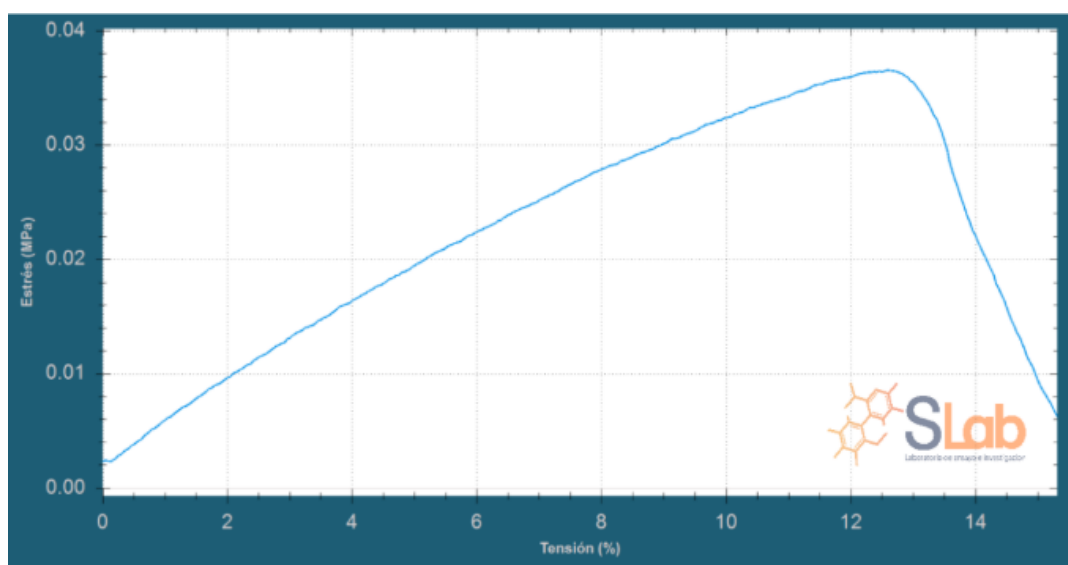
Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento A1C1L4 (S-3432)



Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2658, SLab (2026).

Figura 13.

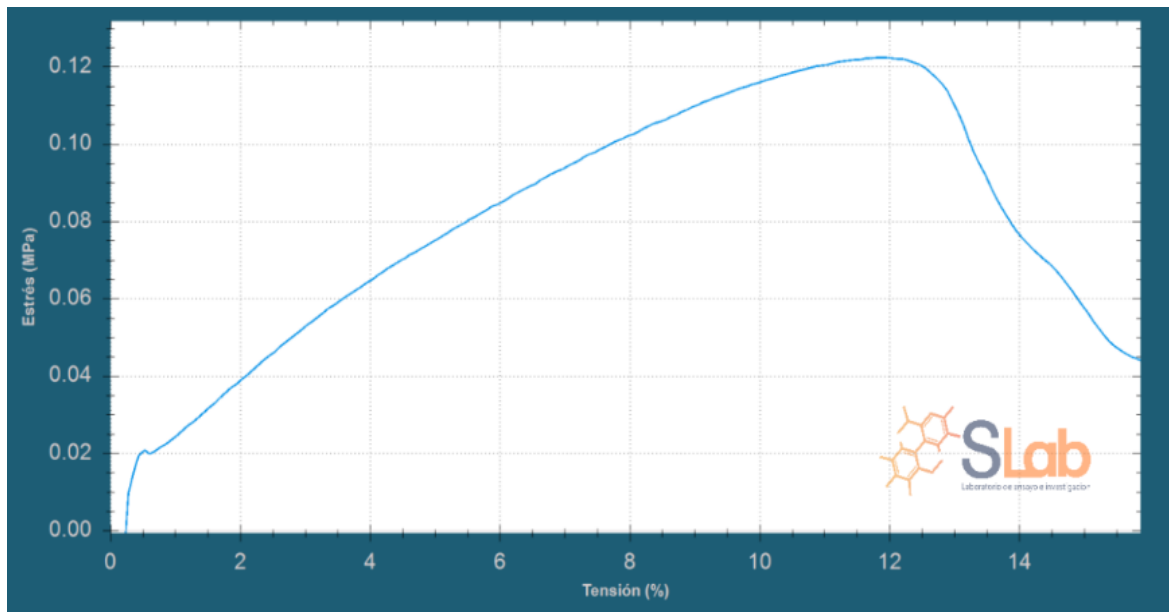
Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento ACL2 (S-3433)



Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2658, SLab (2026).

Figura 14.

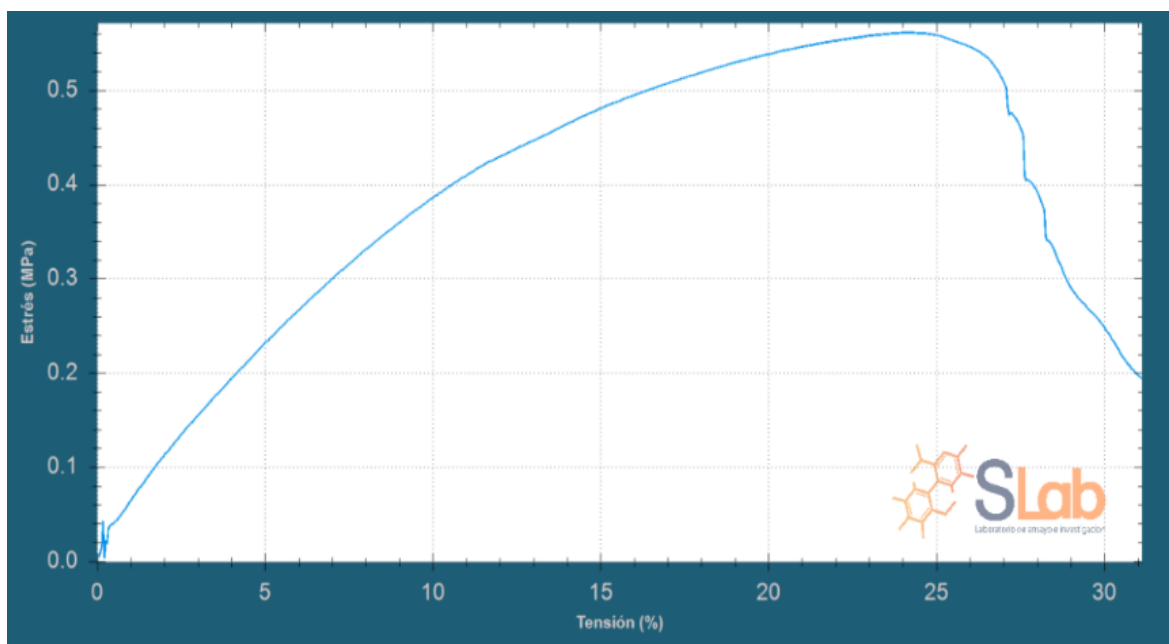
Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento A3C1L2 (S-3434)



Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2658, SLab (2026).

Figura 15.

Resistencia a la tracción y elongación del tratamiento A4C1L1 (S-3435)



Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2658, SLab (2026).

Al visualizar los resultados junto con los gráficos, se identifica un aumento progresivo entre los tratamientos, obteniendo valores promedio desde 0,019 MPa (A1C1L4) hasta 0,578 MPa (A4C1L1). Del mismo modo, la elongación presentó un aumento progresivo desde 5,593% (A1C1L4) hasta 27,407% (A4C1L1), sugiriendo que un mayor contenido de almidón podría favorecer a una mejor resistencia ante la deformación y tensión.

Estos resultados guardan relación con Otero y Figueroa (2024), quienes obtuvieron valores de elongación entre 9,85%-22,4%, demostrando que la presencia de compuestos lignocelulósicos provenientes de la cascarilla de cacao podrían ser los responsables de obtener datos similares, aunque el valor más alto obtenido (27,407%) sería resultado del incremento del almidón en la formulación a comparación de los tratamientos formulados por los autores. Por otro lado, sobre tracción, sus resultados oscilan entre 0,74 a 1,75 MPa que, al ser comparados por los de la presente investigación, fueron relativamente menores por la posible presencia de compuestos lignocelulósicos, los cuales pueden generar cambios dentro de la matriz polimérica y afectar la distribución uniforme de esfuerzos.

De la misma manera, Cabrejos, et al. (2024) en su investigación menciona que el incremento de la presencia de compuestos celulósicos favorece la resistencia a la tracción por el refuerzo estructural dentro de la matriz polimérica, comportamiento que coincide con el comportamiento observado en A4C1L1, que podría estar relacionado con el mayor contenido de almidón presente en la formulación, favoreciendo la formación de una matriz más continua y flexible capaz de soportar mayores esfuerzos mecánico.

También, Pérez (2021) comenta que, a mayores concentraciones de glicerina, se incrementa la elongación de las películas por el aumento de movilidad molecular y reducción de fuerzas intermoleculares, explicando los resultados obtenidos que fueron mayores a comparación de los datos referidos como antecedentes por tener 10 ml de glicerol empleados como plastificante en su composición.

Por último, Carrillo (2022) obtuvo valores bajos de resistencia mecánica en bioplásticos obtenidos a partir de la cascarilla de cacao con resultados de UTS= 0,167 MPa con

5,45% máximo de carga y 5,25 % de deformación, concluyendo que el alto contenido de almidón influía en la compactación estructural del material. Sin embargo, en el presente trabajo de investigación, la alta presencia de almidón gelatinizado junto con lignina y celulosa permitió mejorar progresivamente las propiedades mecánicas de los bioplásticos elaborados.

4.2.2.2. Prueba de dureza

La prueba de dureza, ejecutada por la norma ISO 868:2003, tuvo los siguientes resultados.

Tabla 14.

Resultados de dureza (HA) de los tratamientos de bioplástico

Tratamiento	Código de muestra	Unidad	# de probeta	Resultado	Promedio
A1C1L4	S-3436	HA	1	0,1	0,14
			2	0,2	
			3	0,1	
			4	0,2	
			5	0,1	
ACL2	S-3437	HA	1	0,5	0,64
			2	0,7	
			3	0,8	
			4	0,5	
			5	0,7	
A3C1L2	S-3438	HA	1	11	11,6
			2	11	
			3	12	
			4	12	
			5	12	
A4C1L1	S-3439	HA	1	46	46,4
			2	45	
			3	47	
			4	48	
			5	46	

Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2659, SLab (2026).

Los resultados de dureza mostraron un incremento considerable entre tratamientos, en donde A1C1L4 tuvo resultados de 0,1 HA a comparación de 46,4 HA con la muestra A4C1L1, demostrando así que la composición (concentraciones de almidón, lignina y celulosa) del bioplástico influye en la rigidez superficial y dureza, lo que sugiere que las

proporciones de almidón, lignina y celulosa influyen en la rigidez superficial del bioplástico y en su resistencia a la deformación por penetración.

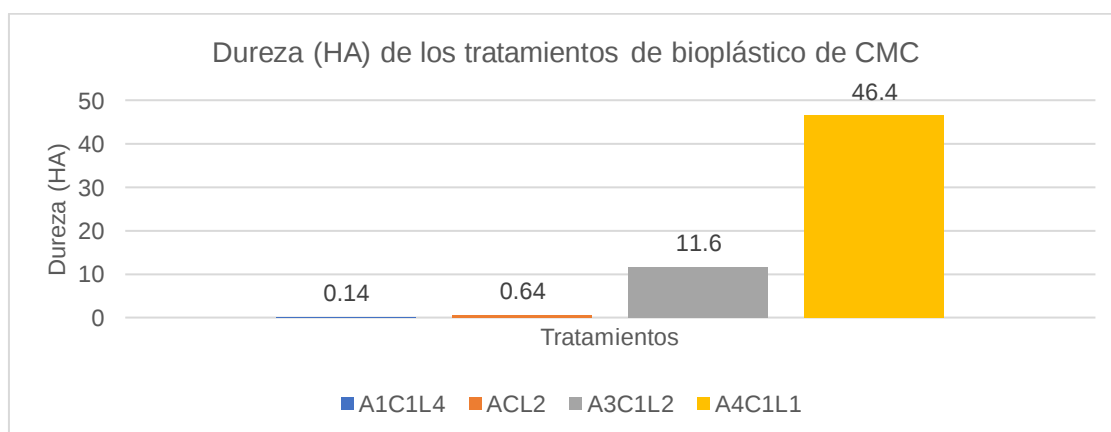
En el caso de la muestra A4C1L1, esta presentó mayor dureza que podría estar asociada a una mayor compactación estructural de los biopolímeros presentes en su composición, especialmente almidón y lignina, favoreciendo a la reducción de movilidad estructural e incrementando la resistencia mecánica superficial del material.

Estos resultados presentan una tendencia superior a la mencionada por Carrillo (2022), quien obtuvo valores entre 7 y 15,5 HD en empaques biodegradables a partir de residuos de la industria del cacao, debiéndose posiblemente a las variaciones de concentraciones de almidón, lignina y celulosa utilizadas en las formulaciones de cada uno de los tratamientos.

Por otro lado, los tratamientos con menor dureza presentaron menor resistencia mecánica y menor capacidad de deformación, característica propia del glicerol añadido en las formulaciones y la afinidad que este compuesto posee con el almidón gelatinizado, obteniendo una red polimérica más flexible y con menor resistencia a la penetración, reduciendo así la rigidez y favoreciendo la deformación de estos tratamientos.

Figura 16.

Resultados de dureza (HA) en los tratamientos



Fuente: Informe de ensayo IE-2026-2659, SLab (2026).

4.3. Evaluación de resultados

Para el análisis estadístico de las variables evaluadas, se plantearon las siguientes hipótesis:

- a. Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados para la variable analizada.
- b. Hipótesis alternativa (H_1): Al menos uno de los tratamientos presenta diferencias estadísticamente significativas para la variable analizada.

Los resultados obtenidos pasaron por un análisis ANOVA de un factor en cada tratamiento, con la finalidad de concluir si existió o no una diferencia significativa. En caso de que la diferencia sea significativa, se procedió a realizar una prueba Post-Hoc Tukey HSD. Cabe resaltar que, previo al análisis ANOVA, se verificaron los supuestos estadísticos de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos experimentales, con la finalidad de garantizar la validez del análisis paramétrico aplicado.

4.3.1. Permeabilidad de vapor de agua

Tabla 15.

Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Permeabilidad de Vapor de Agua

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F calculado	F crítico ($\alpha=0,05$)	p-valor
Entre grupos (Tratamientos)	0,000000	3	0,000000	49,6141	4,0662	0,00002
Dentro de grupos (Error)	0,000000	8	0,000000	—	—	—
Total	0,000000	11	—	—	—	—

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para Permeabilidad Vapor Agua (WVP) ($F = 49,6141 > F \text{ crítico} = 4,0662$, $p=0,00002 < 0,05$).

Por lo tanto, se rechaza H_0 y se procedió con prueba Post-Hoc (Tukey HSD) para identificar qué pares difieren.

Tabla 16.

Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Permeabilidad de Vapor de Agua

Tratamiento	Media	Desv. Est.	n	Grupo (letra)	Interpretación
ACL2	0,000019	0,000003	3	A	Tratamiento con mayor permeabilidad vapor agua (WVP)
A3C1L2	0,000012	0,000001	3	B	Tratamiento con valor intermedio de permeabilidad vapor agua (WVP)
A4C1L1	0,000007	0,000001	3	C	Tratamiento con valor intermedio de permeabilidad vapor agua (WVP)
A1C1L4	0,000006	0,000000	3	C	Tratamiento con menor permeabilidad vapor agua (WVP)

Con este análisis se concluye que, de las 6 comparaciones posibles entre tratamientos, 5 resultaron estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Es por esto que, el tratamiento ACL2 presenta la mayor Permeabilidad al Vapor de Agua (WVP) (media= 1,93535E-05 g/mhPa) y A1C1L4 la menor (media= 5,92237E-06 g/mhPa).

4.3.2. Humedad

Tabla 17.

Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Humedad (%)

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F calculado	F crítico ($\alpha=0,05$)	p-valor
Entre grupos (Tratamientos)	21,888958	3	7,296319	40,4882	4,0662	0,00003
Dentro de grupos (Error)	1,441667	8	0,180208	—	—	—
Total	23,330625	11	—	—	—	—

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para Humedad ($F=40,4882 > F \text{ crítico}=4,0662$, $p=0,00003 < 0,05$). Por lo tanto, se rechaza H_0 y se procedió con prueba Post-Hoc (Tukey HSD) para identificar qué pares difieren.

Tabla 18.

Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Humedad (%)

Tratamiento	Media	Desv. Est.	n	Grupo (letra)	Interpretación
A4C1L1	21,367	0,575	3	A	Tratamiento con mayor humedad
A3C1L2	20,233	0,580	3	B	Tratamiento con valor intermedio de humedad
A1C1L4	18,333	0,104	3	C	Tratamiento con valor intermedio de humedad
ACL2	18,117	0,208	3	C	Tratamiento con menor humedad

Con este análisis, se concluyó que, de las 6 comparaciones posibles entre tratamientos, 5 resultaron estadísticamente significativas ($p<0,05$). El tratamiento A4C1L1 presenta la mayor humedad (media= 21,3667%) y ACL2 la menor (media= 18,1167%).

4.3.3. Propiedad mecánica de tracción (MPa)

Tabla 19.

Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Tracción (MPa)

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F calculado	F crítico ($\alpha=0,05$)	p-valor
Entre grupos	0,619751	3	0,206584	2392,8623	4,0662	0,00000
Dentro / Error	0,000691	8	0,000086	—	—	—
Total	0,620442	11	—	—	—	—

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para Resistencia a la Tracción ($F=2392,8623 > F \text{ crítico } =4,0662$, $p=0,00000 < 0,05$). Por lo tanto, se rechaza H_0 y se procedió con prueba Post-Hoc (Tukey HSD) para identificar qué pares difieren.

Tabla 20.

Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Tracción (MPa)

Tratamiento	Media	Desv. Est.	n	Letra	Rango
A4C1L1	0,578	0,018	3	A	Tratamiento con mayor tracción
A3C1L2	0,120	0,003	3	B	Tratamiento con valor intermedio de tracción
ACL2	0,043	0,005	3	C	Tratamiento con valor intermedio de tracción
A1C1L4	0,019	0,002	3	C	Tratamiento con menor tracción

Con el anterior análisis, se concluyó que, de las 6 comparaciones posibles entre tratamientos, 5 resultaron estadísticamente significativas ($p<0,05$). El tratamiento A4C1L1 presenta la mayor tracción (media=0,578) y A1C1L4 la menor (media=0,019)

4.3.4. Propiedad mecánica de elongación (%)

Tabla 21.

Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de Elongación (%)

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F calculado	F crítico ($\alpha = 0,05$)	p-valor
Entre grupos (Tratamientos)	755,254558	3	251,751519	73,7656	4,0662	0,00000
Dentro de grupos (Error)	27,302867	8	3,412858	—	—	—
Total	782,557425	11	—	—	—	—

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para elongación ($F=73,7656 > F \text{ crítico}=4,0662$, $p=0,00000 < 0,05$). Por lo tanto, se rechaza H_0 y se procedió con prueba Post-Hoc (Tukey HSD) para identificar qué pares difieren.

Tabla 22.

Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de Elongación (%)

Tratamiento	Media	Desv. Est.	n	Grupo (letra)	Interpretación
A4C1L1	27,407	3,205	3	A	Tratamiento con mayor elongación en rotura
A3C1L2	13,467	1,665	3	B	Tratamiento con valor intermedio de elongación en rotura
ACL2	12,283	0,500	3	B	Tratamiento con valor intermedio de elongación en rotura
A1C1L4	5,593	0,597	3	C	Tratamiento con menor elongación en rotura

Con este análisis se concluye que, de las 6 comparaciones posibles entre tratamientos, 5 resultaron estadísticamente significativas ($p < 0,05$). El tratamiento A4C1L1 presenta la mayor elongación en rotura (media = 27,4067%) y A1C1L4 la menor (media = 5,5933%).

4.3.5. Propiedad mecánica de dureza (HA)

Tabla 23.

Análisis estadístico ANOVA de un factor a la variable de dureza (HA)

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F calculado	F crítico ($\alpha=0,05$)	p-valor
Entre grupos (Tratamientos)	7120,885500	3	2373,628500	5857,1956	3,2389	0,00000
Dentro de grupos (Error)	6,484000	16	0,405250	—	—	—
Total	7127,369500	19	—	—	—	—

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para Dureza Shore A ($F=5857,1956 > F \text{ crítico}=3,2389$, $p=0,00000 < 0,05$). Por lo tanto, se rechaza H_0 y se procedió a realizar la prueba Post-Hoc (Tukey HSD) para identificar qué pares difieren.

Tabla 24.

Análisis estadístico TUKEY HSD para identificar pares diferidos en la variable de dureza (HA)

Tratamiento	Media	Desv. Est.	n	Grupo (letra)	Interpretación
A4C1L1	46,400	1,140	5	A	Tratamiento con mayor dureza shore a
A3C1L2	11,600	0,548	5	B	Tratamiento con valor intermedio de dureza shore a
ACL2	0,640	0,134	5	C	Tratamiento con valor intermedio de dureza shore a
A1C1L4	0,140	0,055	5	C	Tratamiento con menor dureza shore a

De las 6 comparaciones posibles entre tratamientos, 5 resultaron estadísticamente significativas ($p<0,05$). El tratamiento A4C1L1 presenta la mayor dureza shore a (media=46,4000 HA) y A1C1L4 la menor (media=0,1400 HA).

V. CONCLUSIONES

1. La cáscara de mazorca de cacao constituye una materia prima viable para la obtención de almidón, celulosa y lignina, lo que demuestra su potencial de aprovechamiento como fuente de biopolímeros y como alternativa de valorización de este residuo agroindustrial para la elaboración de materiales biodegradables.
2. Los biopolímeros obtenidos permitieron formular y elaborar bioplásticos mediante el método de moldeo por vertido, obteniéndose materiales con espesores uniformes. Asimismo, la elevada temperatura de gelatinización del almidón extraído evidenció que su transformación requiere condiciones térmicas superiores a las empleadas convencionalmente para otros almidones.
3. La variación de las concentraciones de almidón, celulosa y lignina influyó significativamente en las propiedades de barrera de los bioplásticos. Una mayor proporción de lignina favoreció la reducción de la permeabilidad al vapor de agua debido a su naturaleza hidrofóbica, mientras que el incremento del contenido de almidón estuvo relacionado con una mayor afinidad del material por la humedad.
4. Las propiedades mecánicas de los bioplásticos estuvieron determinadas significativamente por su composición biopolimérica. Las formulaciones con mayor concentración de almidón presentaron un mejor desempeño en resistencia a la tracción, elongación y dureza, lo que evidencia que este componente, en interacción con el glicerol, favorece la formación de una matriz polimérica más resistente y con mayor capacidad de deformación.
5. La composición de los bioplásticos determinó un comportamiento diferenciado entre sus propiedades mecánicas y de barrera. El tratamiento A1C1L4 presentó el mejor desempeño como barrera al vapor de agua, mientras que A4C1L1 destacó por sus propiedades mecánicas. Por tanto, no se identificó una formulación que optimizara simultáneamente todas las propiedades evaluadas, por lo que la selección del tratamiento debe realizarse en función de la aplicación final prevista para el material.

VI. RECOMENDACIONES

- 1.** Estandarizar el grado de madurez de la CMC como variable de entrada controlada, debido a su posible influencia sobre la variabilidad del rendimiento de almidón.
- 2.** Evaluar la incorporación de etapas adicionales de molienda ultrafina (molino coloidal o de bolas) para mejorar la liberación del almidón de la matriz lignocelulósica con la finalidad de incrementar la liberación de almidón y mejorar el rendimiento de extracción.
- 3.** Explorar formulaciones intermedias entre A1C1L4 y A4C1L1, con la finalidad de identificar una composición que permita equilibrar las propiedades de barrera al vapor de agua y resistencia mecánica del bioplástico.
- 4.** Complementar la evaluación con análisis de biodegradabilidad según norma ASTM D5988 o ISO 17556, debido a que la biodegradabilidad constituye una de las principales ventajas del material frente a polímeros sintéticos convencionales.
- 5.** Se recomienda la formulación A1C1L4 para el desarrollo de materiales destinados a aplicaciones de empaque en las que se priorice una menor permeabilidad al vapor de agua, debido al efecto favorable de su mayor contenido de lignina sobre las propiedades de barrera. Asimismo, se recomienda la formulación A4C1L1 para aplicaciones en las que se requiera mayor resistencia mecánica, flexibilidad y capacidad de deformación, como envolturas, láminas o materiales que deban soportar manipulación.
- 6.** Evaluar la compatibilidad del bioplástico con sellado térmico para determinar su viabilidad como material potencial para aplicaciones de empaque alimentario en la industria peruana.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akinjokun, A., Petrik, L., Ogunfowokan, A., Ajao, J., & Ojumu, T. (2021). Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from cocoa pod husk (CPH) biomass wastes. *Heliyon*, 7(4), 1-7.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06680>
- Avellán, A., Díaz, D., Mendoza, A., Zambrano, M., Zamora, Y., & Riera, M. (2020). Obtención de bioplástico a partir de almidón de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 7(1), 1-11. Obtenido de https://www.revistas.up.ac.pa/index.php/revista_colon_ctn/article/view/1134/948
- Azmin, S., Hayat, N., & Nor, M. (2020). Development and characterization of food packaging bioplastic film from cocoa pod husk cellulose incorporated with sugarcane bagasse fibre. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(4), 248-255. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.10.003>
- Banco Central de Reserva del Perú. (2026). *TUMBES: Síntesis de Actividad Económica Diciembre 2025*. Tumbes: Banco Central de Reserva del Perú. Obtenido de <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Piura/2025/presentacion-tumbes-12-2025.pdf>
- Batista, L. (2009). *Guía Técnica El Cultivo de Cacao*. Santo Domingo: CEDAF. Obtenido de <http://www.cedaf.org.do/publicaciones/guias/download/cacao.pdf>
- Cabrejos, K., Maluquis, J., Díaz, A., & Minchán, H. (2024). Caracterización de las propiedades mecánicas del bioplástico de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y compuestos celulósicos de café (*Coffea arabica* L.). *PAKAMUROS*, 12(2), 88-101. doi:10.37787/rft0ar53
- Carrillo, M. (2022). *Desarrollo de empaques biodegradables a partir de harina de cascarilla de cacao (*Theobroma cacao* L.) para el sector productivo artesanal*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Obtenido de <http://201.159.223.180/bitstream/3317/17933/1/T-UCSG-PRE-TEC-CIA-83.pdf>
- Cerrón, G. (2012). *Asistencia Técnica dirigida en Manejo de Cultivo de Cacao*. Junín: Agrobanco. Obtenido de https://www.agrobanco.com.pe/wp-content/uploads/2017/07/010-f-cacao_CULTIVOS_.pdf

- Cheah, W., Er, A., Aiyub, K., Mohd, N., Ngan, S., Chew, K., . . . Show, P. (2023). Current status and perspectives of algae-based bioplastics: A reviewed potential for sustainability. *Algal Research*, 71, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103078>
- Conde, T., & Dominguez, J. (2021). *Evaluación de la eficiencia coagulante-floculante de la cáscara de cacao (CCN-51) y yuca (Manihot esculenta) en agua superficial: Río Tenguel*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/57968/1/BINGQ-IQ-21P77.pdf>
- Ferreira-Santana, R., Ferreira-Bonomo, R., Ramos, O., Brito, R., Soares, L., Dos Santos, A., . . . Martins, C. (2018). Characterization of starch-based bioplastics from jackfruit seed plasticized with glycerol. *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 278–286. doi:10.1007/s13197-017-2936-6
- Gaitán, E., & Roperó, J. (2021). *Planteamiento de un proceso para el desarrollo de platos biodegradables a base de cascarilla de cacao*. Bogotá: Universidad EAN. Obtenido de <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/10903>
- García, L., Bordallo, E., Dopico, D., & Cordero, D. (2013). Obtención de celulosa microcristalina a partir del bagazo de la caña de azúcar. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 47(1), 57-63. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Bordallo-Lopez-2/publication/318131589_Obtencion_de_celulosa_microcristalina_a_partir_del_bagazo_de_la_cana_de_azucar/links/595b87e4aca272f3c08872f6/Obtencion-de-celulosa-microcristalina-a-partir-del-bagazo-de-
- Harvey, A. (1998). *Thermodynamic Properties of Water: Tabulation From the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (NISTIR 5078)*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. doi:10.6028/NIST.IR.5078
- Herrera, J., Villa, L., Olaya, A., & García, L. (2020). Extracción de almidón de cáscara de cacao Theobroma cacao L. como alternativa de bioprospección. *Revista ION*, 33(2), 25-34. doi:10.18273/revion.v33n2-2020002

- Holguin, J. (2019). *Obtención de un bioplástico a partir de almidón de papa*. Bogotá: Fundación Universidad de América. Obtenido de <http://52.0.229.99/bitstream/20.500.11839/7388/1/6132181-2019-1-IQ.pdf>
- Huaracha, M. (2016). *Estudio de la permeabilidad al vapor de agua en películas modificadas de quitosano*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10062>
- Jayakumar, A., Radoor, S., Siengchin, S., Shin, G., & Kim, J. (2023). Recent progress of bioplastics in their properties, standards, certifications and regulations: A review. *Science of the Total Environment*, 163156. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163156>
- Jiménez, C. (2017). *Evaluación de polímeros en pseudotallos de Musa acuminata AAA, Musa sapientum ABB y Musa paradisiaca AAB para elaboración de bioplástico*. El Colegio de la Frontera Sur. Obtenido de https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1586/1/100000058414_documento.pdf
- Joaqui, D., & Villada, H. (2013). Propiedades ópticas y permeabilidad de vapor de agua en películas producidas a partir de almidón. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*(2), 59-68. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11nspe/v11nespa07.pdf>
- Lema, E., & Manzo, N. (2021). *Diseño de una línea de producción de bioplásticos a partir de residuos de cacao con aplicación en envasado de alimentos*. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2eed30b4-598e-45ed-9df8-7c9b6f5389bc/content>
- León, G., León, D., Monroy, M., De la Espriella, S., & Herrera, A. (2020). Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 39(4), 620-626. doi:10.5281/zenodo.4263410
- Lisin, N., Hutomo, G., & Kadir, S. (2015). Hidrolisis Selulosa dari Pod Husk Kakao Menggunakan Asam Sulfat. *Agrotekbis*, 3(4), 482-490. Obtenido de <https://www.neliti.com/publications/246443/hidrolisis-selulosa-dari-pod-husk-kakao-menggunakan-asam-sulfat>

- METTLER TOLEDO. (2015). *Drying Oven vs. Halogen Moisture Analyzer: A Practical Guide to Compare Methods*. Suiza: A&D. Obtenido de https://www.mt.com/dam/non-indexed/po/labtec/13_White_Papers/wp_do-vs-hma/30244570_WP_en_Drying_Oven_vs_HMA_03_2015_LR.pdf
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2026). *Observatorio de COMMODITIES 01-2026*. Lima: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/9599370/7857710-commodities-cacao-n-01.pdf?v=1773350879>
- Niño, L., García, A., Medina, O., & Rojas, C. (2018). Biopelículas fotoactivas: material de empaque en alimentos sensibles a la oxidación. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 457-466. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v21n2/0123-4226-rudca-21-02-00457.pdf>
- Otero, V., & Figueroa, A. (2024). Propiedades físicas de películas comestibles de cáscaras: plátano, yuca, camote, con extracto de cacao. *ESPAMCIENCIA*, 15(2), 31-41. doi:10.51260/revista_espamciencia.v15i2.502
- Ouattara, L., Kouassi, E., Soro, D., Yao, K., Adouby, K., Drogui, A., . . . Aina, P. (2021). Cocoa Pod Husks as Potential Sources of Renewable High-Value-Added Products: A Review of Current Valorizations and Future Prospects. *BioResources*, 16(1), 1988-2020. doi:10.15376/biores.16.1.ouattara
- Pacheco, G., Flores, N., & Rodríguez, R. (2014). Bioplásticos. *BioTecnología*, 18(2), 27-36. Obtenido de https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista_2014_V18_N2.pdf
- Peñaranda, O., Perilla, J., & Algecira, N. (Diciembre de 2008). Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 28(3), 47-52. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2945796.pdf>
- Pérez, Y. (2021). *Propiedades mecánicas, físicas y características microbiológicas en películas biodegradables obtenidas a partir de almidón modificado de papa Canchán y glicerina*. Andahuaylas: Universidad Nacional José María Arguedas. Obtenido de <https://repositorio.unajma.edu.pe/handle/20.500.14168/642>
- Pizá, H., Rolando, S., Ramirez, C., Villanueva, S., & Zapata, A. (2017). *Análisis experimental de la Elaboración de Bioplástico a partir de la Cáscara de Plátano*

para el Diseño de una Línea de Producción Alternativa para las Chifleras de Piura, Perú. Piura: Universidad de Piura. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3224/PYT_Informe_Final_Proyecto_Bioplastico.pdf?sequence=1

- Ribeiro, A., Santos, A., & Figueiras, A. (2023). 3 - Lignin nanoparticle-based nanocomposite hydrogels for biomedical applications. *Nanotechnology in Biomedicine*, 69-90. doi:10.1016/B978-0-323-99638-9.00003-4
- Robyt, J. (2008). Starch: Structure, Properties, Chemistry, and Enzymology. *Glycoscience*, 1437–1472. doi:https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-540-30429-6_35
- Romero, C. (2016). *Estudio del Cacao en el Perú y en el mundo: Situación Actual y Perspectivas en el Mercado Nacional e Internacional al 2015*. Ministerio de Agricultura y Riego. Lima: MINAGRI-DEEIA. Obtenido de <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-cacao-Peru-y-Mundo.pdf>
- Ruiloba, I., Li, M., Quintero, R., & Correa, J. (2018). Elaboración de bioplástico a partir de almidón de semillas de mango. *Revista De Iniciación Científica*, 4, 28-32. doi:<https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1815>
- Tapay, M., Compoverde, C., & Chinga, J. (2025). Aprovechamiento Integral de la mazorca del cacao: una visión desde la Ingeniería y la Gestión Sostenible. *Revista G-ner@ndo*, 6(2), 2351-2365. Obtenido de <https://revista.gnerando.org/revista/index.php/RCMG/article/view/822/859>
- Thompson, R., Moore, C., vom Saal, F., & Swan, S. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions B*, 364(1526), 2153–2166. doi:10.1098/rstb.2009.0053
- Tirado, D., Montero, P., & Acevedo, D. (2015). Estudio Comparativo de Métodos Empleados para la Determinación de Humedad de Varias Matrices Alimentarias. *Información Tecnológica*, 26(2), 3-10. doi:10.4067/S0718-07642015000200002
- Tito, G. (2022). *Desarrollo y caracterización de recubrimientos comestibles a partir de residuos de la cadena de beneficio de cacao (Theobroma cacao L.): Mazorca*.

- Los Ríos: Universidad Técnica estatal de Quevedo. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/19ac276d-b6a6-4c0a-9afe-438b318aba97/content>
- Torres, M. (2019). *Obtención de celulosa a partir de la cáscara de cacao ecuatoriano (Theobroma cacao L.) mediante hidrólisis térmica para la elaboración de pulpa de papel*. Quito: Universidad Central de Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/19765/1/T-UCE-0017-IQU-059.pdf>
- Torres, Y. (2016). *Caracterización de biomasa lignocelulósica (Theobroma cacao L.) para su uso en la obtención de etanol por vía fermentativa*. Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9170/TorresLealYeniferJa-sneidy2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas, Y., & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 59-72. Obtenido de <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/download/3108/2874/>
- Villamizar, A., & López, L. (2017). Cáscara de cacao fuente de polifenoles y fibra: simulación de una planta piloto para su extracción. *Respuestas*, 22(1), 75-83. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5848296.pdf>
- Villegas, J. (2022). *Desarrollo y caracterización de recubrimientos comestibles a partir de residuos de la cadena de beneficio de cacao (Theobroma cacao L.): cascarilla*. Los Ríos: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/8ec05d21-ea90-455b-87d6-882ef6bcc2d0/content>
- Vivanco, E., Castro, L., & Campos, M. (2018). Caracterización físico-química de la cascarilla de Theobroma cacao L, variedades Nacional y CCN-51). *Conference Proceedings UTMACH*, 2(1), 213-223.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1. OBTENCIÓN DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO

Figura 17.

Selección de materia prima (cáscara de mazorca de cacao)



Figura 18.

Zona Cacaotera La Palma (Papayal, Zarumilla)



ANEXO 2. OBTENCIÓN ALMIDÓN DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO

Figura 19.

Secado artesanal de cáscara de mazorca de cacao



Figura 20.

Secado de cáscara de mazorca de cacao en estufa



Figura 21.

Molienda de cáscara de mazorca de cacao



Figura 22.

Almidón de cáscara de mazorca de cacao



ANEXO 3. OBTENCIÓN CELULOSA DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO

Figura 23.

Preparación de solución de NaOH 1 M



Figura 24.

Preparación de solución NaOH 1M con cáscara de mazorca de cacao triturada



Figura 25.

Tratamiento alcalino de NaOH y CMC a 90°C durante 4 horas en estufa



Figura 26.

Lavado de celulosa alcalina

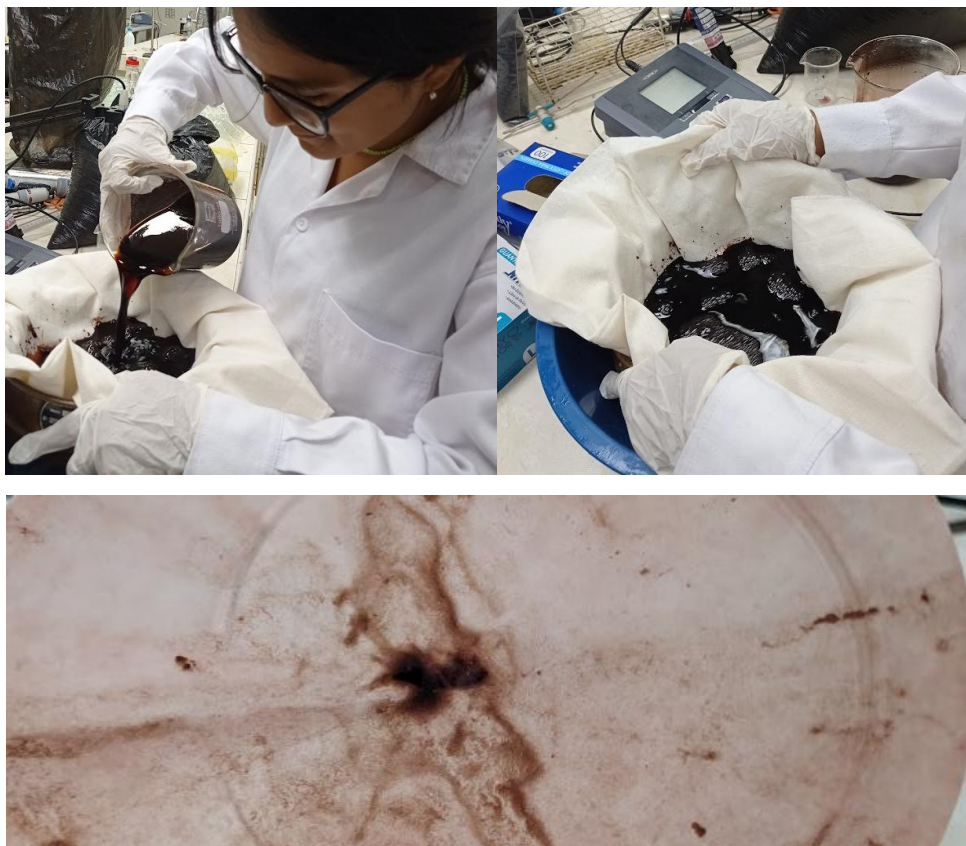


Figura 27.

Adición de Peróxido de Hidrógeno a celulosa alcalina



Figura 28.

Lavado de celulosa blanqueada



Figura 29.

Celulosa blanqueada seca



Figura 30.

Celulosa blanqueada molida y tamizada



ANEXO 4. OBTENCIÓN LIGNINA DE CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO

Figura 31.

Cáscara de mazorca de cacao molida en solución de Ácido Sulfúrico para hidrólisis ácida en autoclave



Figura 32.

Lignina ácida seca



Figura 33.

Lignina ácida molida y tamizada



ANEXO 5. PROCESO DE ELABORACIÓN DE BIOPLÁSTICO

Figura 34.

Almidón, lignina y celulosa de CMC



Figura 35.

Gelatinización del almidón



Figura 36.

*Adición de solución de bioplástico a molde de 20*20 cm*

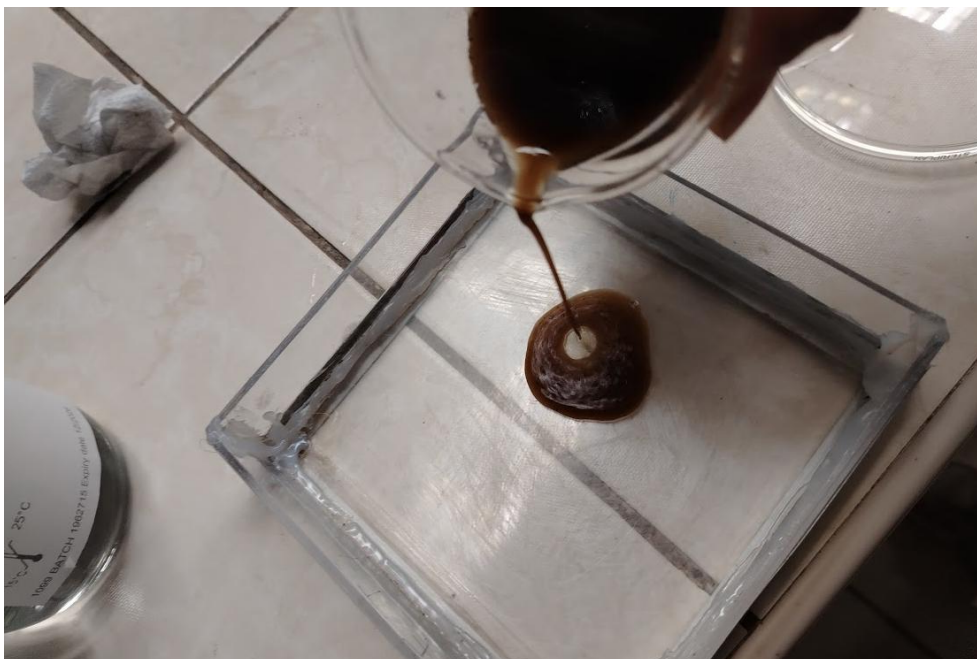


Figura 37.

Bioplásticos



ANEXO 6. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD DE VAPOR DE AGUA

Figura 38.

Pesado y ubicado de silicagel en tubos de ensayo



Figura 39.

Tubos de ensayo en desecante para estudio de permeabilidad de vapor de agua



Figura 40.

Tubos de ensayo para estudio



Figura 41.

Registro de temperatura y HR% de cámara desecante



ANEXO 7. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN BIOPLÁSTICOS

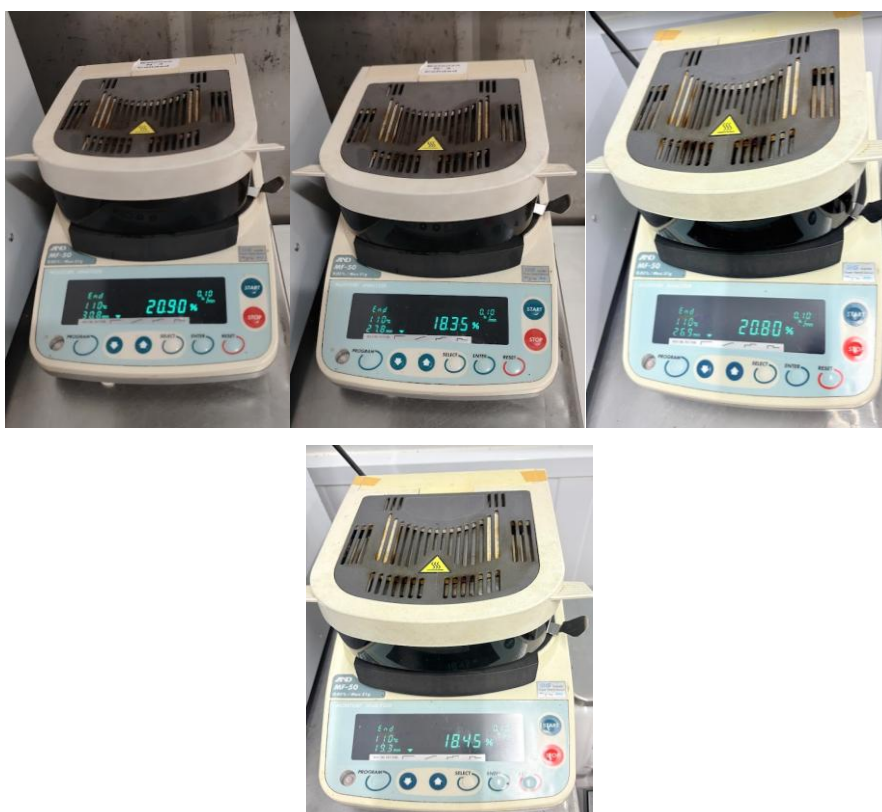
Figura 42.

Medición de Humedad (%) en termobalanza



Figura 43.

Mediciones de humedad (%) de los tratamientos



ANEXO 8. DETERMINACIÓN DE ELONGACIÓN Y TRACCIÓN EN BIOPLÁSTICOS



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS
S.A.C.

INFORME DE ENSAYO

IE-2026-2658

1. DATOS DEL CLIENTE

- 1.1 Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
1.2 RUC o DNI : 20177689051
1.3 Dirección : CIUDAD UNIVERSITARIA S/N, PAMPA GRANDE, TUMBES, TUMBES

2. DATOS DE LA MUESTRA

- 2.1 Producto : BIOPLÁSTICO
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)
2.3 Número de Muestras : 04
2.4 Fecha de Recepción : 2026-05-08
2.5 Período de Ensayo : 2026-05-08 al 2026-05-16
2.6 Fecha de Emisión : 2026-05-18
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Precisa
2.8 N° de cotización : COT-131960-SL26

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Resistencia a la Tracción y elongación MD (espesor < 1mm) (Contempla 3 probetas)	ASTM D882 Método de prueba estándar para propiedades de tracción de láminas de plástico delgadas

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA:

Nombre del Proyecto: Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (Theobroma cacao L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico (c)


DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO
QUIMICO CQP 1337

VERGARAY D'ARRIGO
DIEGO ROMANO
DNI:45841126
QUIMICO CQP 1337

INFORME DE ENSAYO IE-2026-2658

Código de Muestra	Descripción de Muestras
S-3432	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A1C1L4 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)
S-3433	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: ACL2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)
S-3434	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A3C1L2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)
S-3435	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A4C1L1 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de Probeta	Resultado	Promedio de Resultado
S-3432	Resistencia a la Tracción-MD	MPa	1	0.018	0.019
			2	0.021	
			5	0.019	

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de Probeta	Resultado	Promedio de Resultado
S-3432	Elongación-MD	%	1	5.14	5.59
			2	6.27	
			5	5.37	

Nota: El resultado corresponde al promedio de ensayar en 3 probetas, registrándose la ruptura total de forma inmediata al aplicar una carga mínima.

**MD: Dirección Longitudinal*

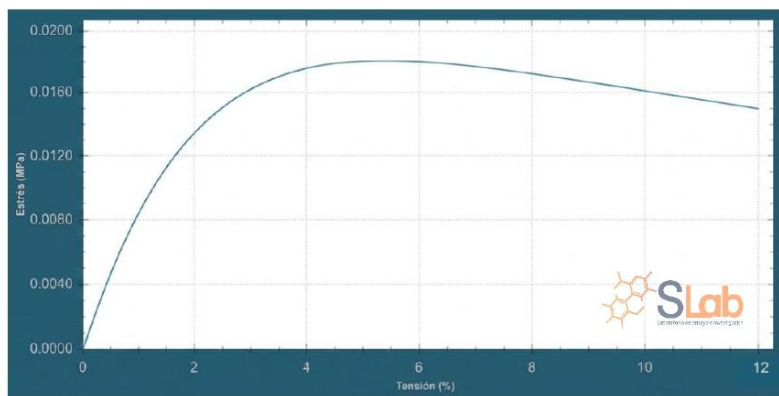


Figura N°1: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ELONGACIÓN (S-3432)

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de Probeta	Resultado	Promedio de Resultado
S-3433	Resistencia a la Tracción-MD	MPa	1	0.037	0.043
			2	0.044	
			5	0.047	

Tabla N°4: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de Probeta	Resultado	Promedio de Resultado
S-3433	Elongación-MD	%	1	12.63	12.28
			2	11.71	
			5	12.51	

Nota: El resultado corresponde al promedio de ensayar en 3 probetas, registrándose la ruptura total de forma inmediata al aplicar una carga mínima.

**MD: Dirección Longitudinal*

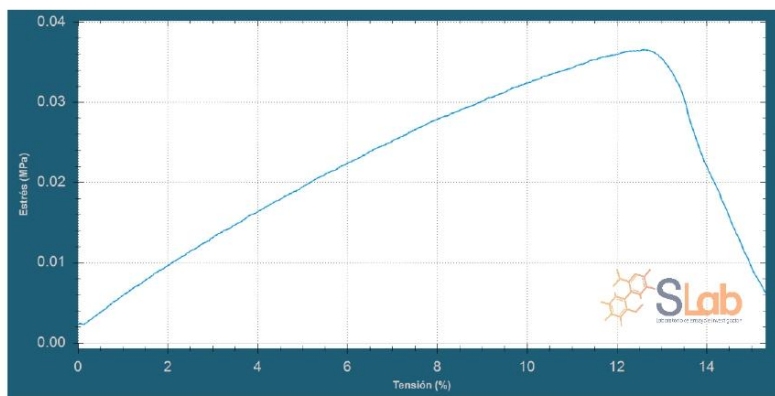


Figura N°2: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ELONGACIÓN (S-3433)

Tabla N°5: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de Probeta	Resultado	Promedio de Resultado
S-3434	Resistencia a la Tracción-MD	MPa	1	0.116	0.120
			2	0.122	
			5	0.121	

Tabla N°6: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de Probeta	Resultado	Promedio de Resultado
S-3434	Elongación-MD	%	1	15.14	13.47
			2	11.81	
			5	13.45	

Nota: El resultado corresponde al promedio de los valores obtenidos al ensayar en 3 probetas.

**MD: Dirección Longitudinal*

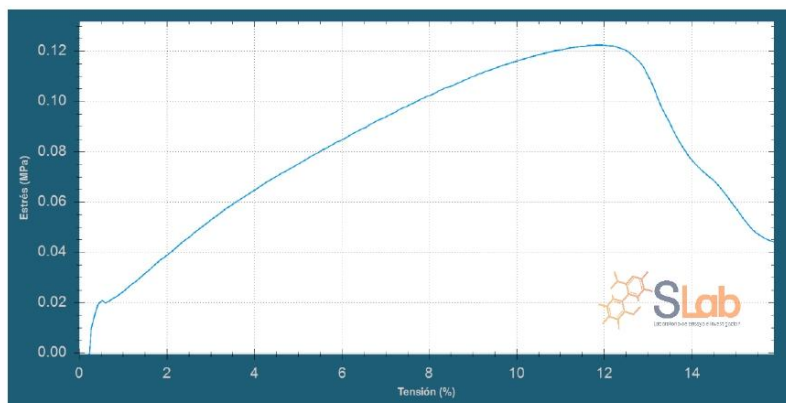


Figura N°3: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ELONGACIÓN (S-3434)

Tabla N°7: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Unidad	Número de Probeta	Resultado
S-3435	Resistencia a la Tracción-MD	MPa	1	0.561	0.578
			2	0.596	
			5	0.578	

Tabla N°8: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Unidad	Número de Probeta	Resultado
S-3435	Elongación-MD	%	1	27.39	27.40
			2	24.21	
			5	30.62	

*Nota: El resultado corresponde al promedio de los valores obtenidos al ensayar en 3 probetas.
MD: Dirección Longitudinal

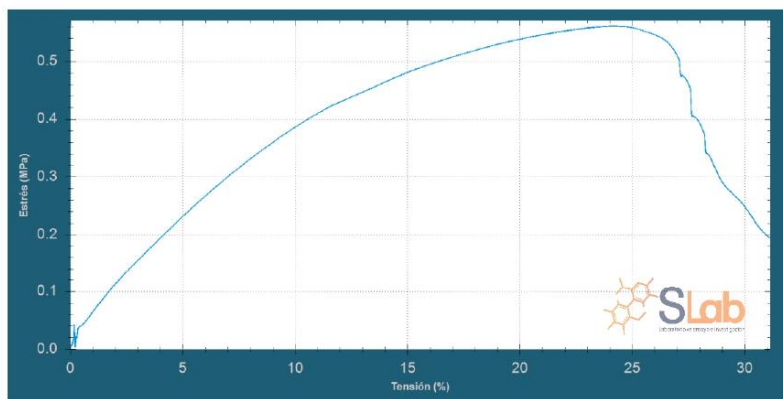


Figura N°4: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ELONGACIÓN (S-3435)

Leyenda

(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

FIN DE DOCUMENTO

ANEXO N° 0290 - 2026

EL PRESENTE **ANEXO** ES EMITIDO POR **SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC** QUIEN ASEGURA HABER ANALIZADO LA MUESTRA PROPORCIONADA POR NUESTRO CLIENTE A QUIEN SE IDENTIFICA POSTERIORMENTE.

Informe de Ensayo IE-2026-2658

1. DATOS DEL CLIENTE

- | | | | |
|-----|-----------|---|---|
| 1.1 | Cliente | : | UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES |
| 1.2 | RUC o DNI | : | 20177689051 |
| 1.3 | Dirección | : | CIUDAD UNIVERSITARIA S/N, PAMPA GRANDE, TUMBES,
TUMBES |

2. DATOS DE LA MUESTRA

- | | | | |
|-----|--------------------------|---|--------------------------|
| 2.1 | Producto | : | BIOPLÁSTICO |
| 2.2 | Muestreado por | : | CLIENTE ^(e) |
| 2.3 | Número de Muestras | : | 04 |
| 2.4 | Fecha de Recepción | : | 2026-05-08 |
| 2.5 | Periodo de Ensayo | : | 2026-05-08 al 2026-05-16 |
| 2.6 | Fecha de Emisión | : | 2026-05-18 |
| 2.7 | Fecha y Hora de Muestreo | : | No Precisa |
| 2.8 | N° de Cotización | : | COT-131960-SL26 |

3. INFORMACIÓN ADICIONAL

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

3.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Código de Muestra	Descripción de Muestra
S-3432	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A1C1L4 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)
S-3433	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: ACL2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)
S-3434	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A3C1L2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)
S-3435	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A4C1L1 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)

Nombre del Proyecto: Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico ^(c)

3.2. REPORTE FOTOGRÁFICO

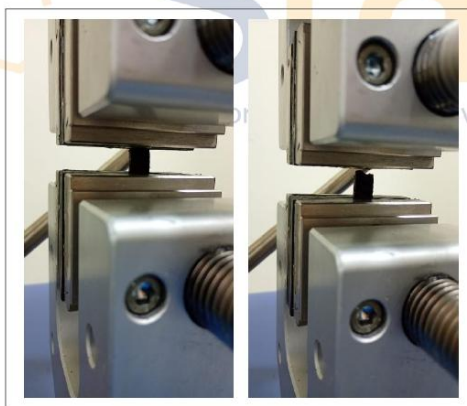


Imagen N°01: ANTES DE RUPTURA / DEPUÉS DE RUPTURA (S-3432)

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

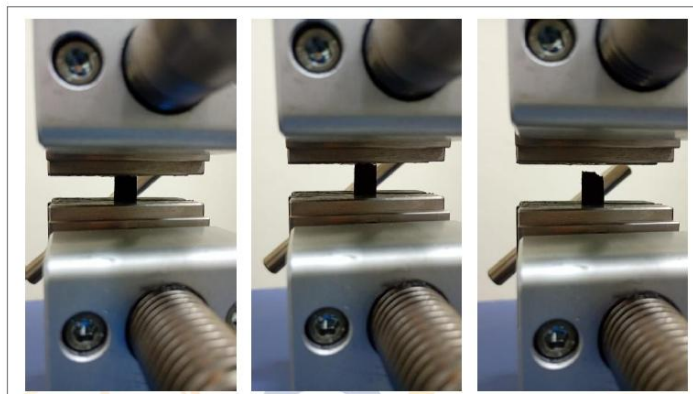


Imagen N°02: ANTES DE RUPTURA / DURANTE LA RUPTURA / DEPUÉS DE RUPTURA (S-3433)



Imagen N°03: ANTES DE RUPTURA / DURANTE LA RUPTURA / DEPUÉS DE RUPTURA (S-3434)

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

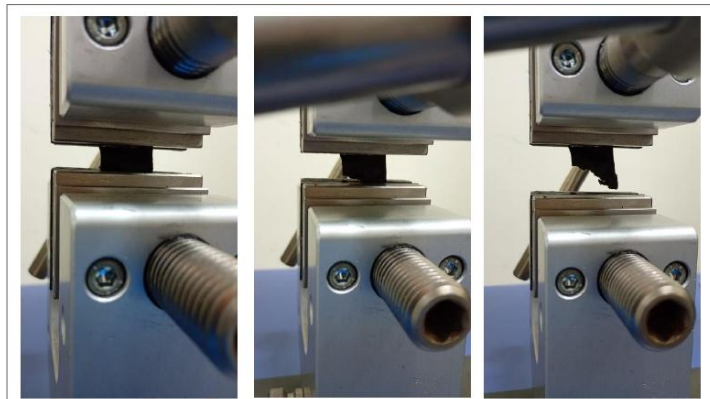


Imagen N°04: ANTES DE RUPTURA / DURANTE LA RUPTURA / DEPUÉS DE RUPTURA (S-3435)

FIN DE DOCUMENTO

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

ANEXO 9. DETERMINACIÓN DE DUREZA EN BIOPLÁSTICOS



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS
S.A.C.

INFORME DE ENSAYO

IE-2026-2659

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
1.2 RUC o DNI : 20177689051
1.3 Dirección : CIUDAD UNIVERSITARIA S/N, PAMPA GRANDE, TUMBES, TUMBES

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : POLÍMEROS Y PLÁSTICOS
2.2 Muestreado por : CLIENTE (c)
2.3 Número de Muestras : 04
2.4 Fecha de Recepción : 2026-05-08
2.5 Período de Ensayo : 2026-05-08 al 2026-05-15
2.6 Fecha de Emisión : 2026-05-18
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Precisa
2.8 N° de cotización : COT-132070-SL26

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Determinación de la Dureza (Shore D)	ISO 868:2003. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (dureza Shore).

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA:

Nombre del Proyecto: Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico (c)

VERGARAY D'ARRIGO
DIEGO ROMANO
DNI:45841126
QUÍMICO CQP 1337

INFORME DE ENSAYO IE-2026-2659

Código de Muestra	Descripción de Muestras
S-3436	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A1C1L4 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)
S-3437	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: ACL2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)
S-3438	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A3C1L2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)
S-3439	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A4C1L1 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(a)

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de probeta	Resultados
S-3436	Dureza Shore	HA	1	0.1
			2	0.2
			3	0.1
			4	0.2
			5	0.1
			Promedio	0.1

Tabla N°2: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de probeta	Resultados
S-3437	Dureza Shore	HA	1	0.5
			2	0.7
			3	0.8
			4	0.5
			5	0.7
			Promedio	0.6

INFORME DE ENSAYO IE-2026-2659

Tabla N°3: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de probeta	Resultados
S-3438	Dureza Shore	HA	1	11
			2	11
			3	12
			4	12
			5	12
			Promedio	11

Tabla N°4: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Muestra	Parámetro	Unidad	Número de probeta	Resultados
S-3439	Dureza Shore	HA	1	46
			2	45
			3	47
			4	48
			5	46
			Promedio	46

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

(c) Información suministrada por el cliente.

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

FIN DE DOCUMENTO

ANEXO N° 0291 - 2026

EL PRESENTE **ANEXO** ES EMITIDO POR **SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC** QUIEN ASEGURA HABER ANALIZADO LA MUESTRA PROPORCIONADA POR NUESTRO CLIENTE A QUIEN SE IDENTIFICA POSTERIORMENTE.

Informe de Ensayo IE-2026-2659

1. DATOS DEL CLIENTE

- | | | | |
|-----|-----------|---|---|
| 1.1 | Cliente | : | UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES |
| 1.2 | RUC o DNI | : | 20177689051 |
| 1.3 | Dirección | : | CIUDAD UNIVERSITARIA S/N, PAMPA GRANDE, TUMBES,
TUMBES |

2. DATOS DE LA MUESTRA

- | | | | |
|-----|--------------------------|---|--------------------------|
| 2.1 | Producto | : | BIOPLÁSTICO |
| 2.2 | Muestreado por | : | CLIENTE ^(e) |
| 2.3 | Número de Muestras | : | 04 |
| 2.4 | Fecha de Recepción | : | 2026-05-08 |
| 2.5 | Periodo de Ensayo | : | 2026-05-08 al 2026-05-15 |
| 2.6 | Fecha de Emisión | : | 2026-05-18 |
| 2.7 | Fecha y Hora de Muestreo | : | No Precisa |
| 2.8 | N° de Cotización | : | COT-132070-SL26 |

3. INFORMACIÓN ADICIONAL

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

3.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Código de Muestra	Descripción de Muestra
S-3436	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A1C1L4 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)
S-3437	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: ACL2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)
S-3438	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A3C1L2 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)
S-3439	Bioplástico a partir de biopolímeros de cáscara de mazorca de cacao Lote: A4C1L1 Presentación: Lámina 10*10 cm ^(c)

Nombre del Proyecto: Efectos del almidón, lignina y celulosa obtenidos de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) en las propiedades mecánicas y de barrera en un bioplástico ^(c)

3.2. REPORTE FOTOGRÁFICO



Imagen N°01: DUREZA SHORE D (S-3436)

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.



Imagen N°02: DUREZA SHORE D (S-3437)

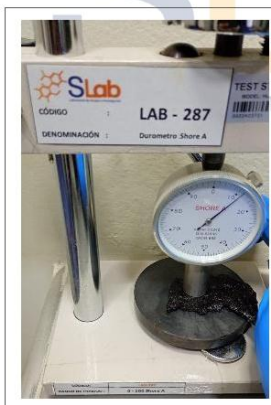


Imagen N°03: DUREZA SHORE D (S-3438)

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.



Imagen N°04: DUREZA SHORE D (S-3439)

FIN DE DOCUMENTO

Laboratorio de ensayo e investigación

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.