

Elaboración de una biopelícula a partir de la semilla de aguacate cultivada en la región de Santander

Valentina Meneses Mendoza y Katherine Nicolle Sarmiento Coy

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad trabajo de investigación

Director:

César Augusto Guevara Lastre

Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Codirector:

Javier Enrique Gómez Ramírez

Magister Ingeniería Metalurgia y Materiales

Tutor:

Camilo Andrés Flórez Becerra

Ing. Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

La culminación de este trabajo de grado representa un logro personal y académico que no habría sido posible sin Dios y sin mi familia. Mis seres queridos son el centro de mi vida y el pilar sobre el cual se construye todo lo que soy; cada paso que di durante este proceso estuvo acompañado de su apoyo constante, su amor incondicional y la tranquilidad de saber que nunca estuve sola. Mi familia ha sido, y seguirá siendo, el motor que me impulsa a mejorar cada día.

Mis padres, *Euclides* y *Carmenza*, son mi mayor fortaleza. Compartir con ellos el día a día ha sido un privilegio que me sostuvo incluso en los momentos más exigentes de la carrera. Su presencia, su cuidado y su amor han sido el impulso silencioso detrás de cada logro. A mis hermanos, *Jathinson* y *Robinsson*, quienes son un ejemplo constante, les agradezco por protegerme, consentirme y buscar siempre lo mejor para mí. La diferencia de edad se ha traducido en guía, apoyo y una preocupación genuina por mi bienestar. De la misma manera, intento retribuir ese amor estando siempre presente para mis sobrinos, acompañándolos, escuchándolos y siendo un apoyo constante en sus vidas. Mis sobrinos, *Isabella* y *Tiago*, quienes con una sonrisa son capaces de transformar cualquier día difícil. Ustedes son una de las razones por las que siempre quiero ser una mejor persona y un ejemplo del que algún día puedan sentirse orgullosos. Cada logro también busca demostrarles que los sueños se alcanzan con esfuerzo, perseverancia y amor. A mi cuñada *Clara*, por el inmenso cariño con el que siempre me ha acogido, por cuidarme como a una hija y por brindarme su apoyo, comprensión y compañía en cada etapa. Gracias por estar siempre presente, por celebrar mis alegrías, acompañarme en los momentos difíciles y por el amor con el que has hecho parte de este camino. A mi tío *Waldo*, por su amor incondicional, por creer firmemente en mí y por estar presente en cada etapa de este proceso; su respaldo, su orgullo y su manera de acompañarme han sido una fuente permanente de motivación y fortaleza, y su presencia ha marcado de manera profunda este logro.

A *Saira* y *Antonia*, mi hermana y sobrina de corazón, porque llegaron a mi vida para quedarse. Por el cariño sincero, la preocupación constante y la manera tan natural de estar presentes, incluso sin que sea necesario decirlo. Al compita *José* y a la señora *Elisabeth*, quienes han sido para mí como tíos, brindándome afecto, cercanía y apoyo.

Finalmente, a mi mamá y hermano sustitutos, Doña *Martha* y *Cristhian*, por su apoyo incondicional, sus consejos constantes, su presencia en los momentos necesarios y el amor genuino que siempre me han brindado. Gracias por abrirme las puertas de su hogar y de su corazón. En ustedes encontré una segunda familia, un lugar donde siempre me sentí querida, escuchada y acompañada. El cariño que les tengo trasciende cualquier vínculo de sangre y ocuparán siempre un lugar muy especial en mi vida.

Valentina Meneses Mendoza.

A mi familia, en especial a mi mamá por su paciencia infinita, amor y apoyo incondicional brindado durante toda mi vida y carrera profesional.

A Ania Díaz, por ser el faro que iluminó los momentos de incertidumbre, gracias por su fe inquebrantable en mi potencial.

A mis compañeros y amigos con los que compartí momentos inolvidables, en especial a Dana Gómez, Paula Orozco y Osvaldo Marín por su apoyo en tiempos difíciles y por recordarme el valor de la perseverancia.

Katherine Nicolle Sarmiento Coy

Agradecimientos

A nuestro director César Guevara y codirector Javier Gómez, por su tiempo y ayuda durante la culminación de este proyecto.

A Valentina, mi compañera, por cada momento compartido durante la carrera, en especial en el último paso de esta etapa profesional.

A los profesores que estuvieron durante el proceso de formación y también a los que creyeron en nuestro potencial académico, porque cada uno aportó conocimientos invaluable para nuestro camino profesional.

A todo el personal profesional de laboratorio que estuvieron guiando y apoyando en el transcurso del proyecto de grado.

Al Tecnoparque Nodo Bucaramanga, por prestarnos sus equipos para llevar a cabo las pruebas mecánicas del proyecto.

A los compañeros que estuvieron apoyándonos durante las prácticas de laboratorio.

A la Universidad Industrial de Santander por haber sido parte de nuestra formación profesional y convertirse en un segundo hogar.

Katherine Nicolle Sarmiento Coy

A lo largo de la carrera, conté con docentes cuya labor fue esencial no solo en mi formación académica, sino también en la construcción de mi criterio profesional y personal; docentes que marcaron mi proceso, me retaron, me guiaron y contribuyeron de manera significativa a mi crecimiento dentro y fuera del aula. Agradezco al profesor *Escalante* y al profesor *Hernando*, cuya metodología de enseñanza excepcional y rigor académico me permitieron desarrollar un profundo interés y aprecio por la termodinámica; al profesor *Crisóstomo*, por su nivel de exigencia, su profundo dominio del conocimiento y su destacada calidad como docente; al profesor *Lambis*, por su pasión por los bioprocesos y una metodología que despierta interés genuino por la asignatura; al profesor *Benavides*, por contribuir de manera decisiva a la formación del carácter y al fortalecimiento del criterio profesional; a los profesores *Ramiro*, *Kafarov*, *Julio* y *Ronald*, cuyo conocimiento y carisma hicieron de su labor docente una experiencia enriquecedora; al profesor *Baldovino*, por enseñarme a analizar los fenómenos cotidianos desde una perspectiva diferente; y a los profesores *Fredy*, *Yuly* y *Débora*, por creer en mi potencial académico, por su disposición constante para apoyar y orientar, y por sus valiosos aportes a mi formación a lo largo de la carrera.

Así mismo, expreso mi más sincero agradecimiento a mis directores y tutor de trabajo de grado. Al profesor *César*, quien me acompañó desde los primeros semestres de la carrera, fue testigo de mi crecimiento académico y personal y confió en mis capacidades a lo largo de mi formación, brindándome orientación constante y valiosos aportes que fueron fundamentales para el planteamiento y desarrollo de esta investigación. Al profesor *Javier*, por su acompañamiento cercano y continuo durante varios años, por su apoyo en los momentos más difíciles, sus consejos oportunos, su disposición permanente para escuchar y su guía académica, contribuyendo de manera significativa tanto a la culminación de este proyecto como a mi formación personal y profesional. De manera especial, agradezco a *Camilo*, quien, como tutor del proyecto, se convirtió en un apoyo fundamental durante la etapa experimental. Su acompañamiento constante en el laboratorio, su disposición para enseñar, resolver dificultades y buscar soluciones, así como su confianza y apoyo incondicional, hicieron posible avanzar en momentos que parecían difíciles de superar.

Agradezco a las personas que hicieron parte de mi proceso durante la vida universitaria y que, de distintas maneras, estuvieron presentes a lo largo de este camino. De manera especial, agradezco a *Neil*, *Dana*, *Johan*, *Danna*, *Mauricio*, *Lesly*, *Santiago*, *Valentina*, *Leiner* y *Caleb*, quienes son mis mejores amigos, no tengo palabras suficientes para agradecerles su compañía constante, su apoyo incondicional y cada uno de los momentos compartidos durante estos años; con ustedes crecí tanto académica como personalmente, y esa cercanía es uno de los tesoros más valiosos que me deja esta etapa de mi vida. Gracias por sostenerme en los momentos de duda y por celebrar conmigo cada pequeño logro a lo largo de este camino. Agradezco también a *Lucho*, por su compañía y por los momentos compartidos a lo largo de este camino. Gracias a todos y cada uno de ustedes por las conversaciones interminables, las horas de estudio, las risas, el apoyo en los momentos de incertidumbre y por hacer más llevaderos los días difíciles; cada experiencia vivida

junto a ustedes dejó enseñanzas, recuerdos inolvidables y una huella que llevaré conmigo mucho más allá de la universidad, y que atesoraré por el resto de mi vida.

Además, quiero agradecer especialmente a *Valentina* y *Santiago*, quienes, además de desarrollar su propio trabajo de grado, estuvieron presentes apoyando múltiples actividades experimentales de este proyecto. Gracias por el tiempo, la disposición, la paciencia y el compromiso demostrado en jornadas largas de laboratorio, en momentos de estrés, cansancio y dificultades durante el desarrollo experimental. Su apoyo constante y colaboración fueron fundamentales para sacar adelante el trabajo realizado.

De igual forma, expreso mi agradecimiento a Don *Wilson* y *Daniel*, por su colaboración, disposición y apoyo constante durante el desarrollo experimental. Gracias por estar siempre dispuestos a ayudar, por buscar soluciones ante cada dificultad y por hacer del laboratorio un espacio de aprendizaje y confianza. Agradezco también a *Junior*, por toda la ayuda brindada durante el desarrollo del trabajo de grado; a *Tecnoparque Nodo Bucaramanga*, por facilitar los servicios y equipos que permitieron realizar la caracterización mecánica del bioplástico, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de esta investigación; a la persona que hizo posible el suministro de las semillas de aguacate empleadas en esta investigación, por su generosidad y constante disposición para colaborar con el proyecto; y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, apoyaron y estuvieron presentes durante este proceso. Sin su colaboración, acompañamiento y disposición, este trabajo no habría sido posible.

Finalmente, agradezco a *Sandra* por el apoyo, la comprensión y los momentos compartidos durante una etapa importante de mi vida, experiencias que dejaron valiosos aprendizajes para mi crecimiento personal. Asimismo, agradezco a *Katherine*, mi compañera de trabajo de grado, por compartir este proceso de investigación.

Valentina Meneses Mendoza.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo general:	21
1.2 Objetivos específicos:	21
2. Marco teórico	22
2.1 Biopelículas	22
2.2 Composición química de la semilla del aguacate	22
2.3 Extracción del almidón	23
2.4 Elaboración de biopelículas a partir de almidón y uso de plastificantes	24
2.5 Propiedades y caracterización de biopelículas	25
3. Estado del arte	26
4. Metodología	30
4.1 Selección de la Técnica de Extracción del Almidón de la Semilla de Aguacate	30
4.1.1 Revisión documental sobre los métodos húmedo y seco	30
4.2 Extracción del Almidón de la Semilla de Aguacate	31
4.2.1 Adecuación de la materia prima	31
4.2.2 Ejecución del proceso de extracción	32
4.2.3 Aplicación de normas técnicas	34
4.3 Elaboración y Caracterización de Biopelículas	36
4.3.1 Preparación de la mezcla filmogénica	36
4.3.2 Gelatinización y vaciado por método casting.	37
4.3.3 Secado, desmolde y acondicionamiento de biopelículas.	38
4.3.4 Ensayos de caracterización	39
5. Resultados	41
5.1 Análisis comparativo y selección del método de extracción	41
5.2 Selección y caracterización de la materia prima	43
5.3 Contenido de humedad	43
5.4 Rendimiento de extracción	44
5.5 Identificación cualitativa del almidón	45

5.6	Espesor.....	45
5.7	Densidad	46
5.8	Hinchamiento.....	46
5.9	Pérdida de masa soluble.....	47
5.10	Propiedades ópticas.....	48
5.11	Propiedades mecánicas	50
6.	Conclusiones	55
7.	Recomendaciones	57
	Referencias bibliográficas.....	58
	Apéndices.....	68

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros ópticos y colorimétricos de las biopelículas formuladas.	49
Tabla 2. Evaluación técnica de los métodos de extracción de almidón.	75
Tabla 3. Contenido de almidón y rendimiento de extracción reportados para diferentes variedades de aguacate.	79
Tabla 4. Datos experimentales para contenido de humedad	79
Tabla 5. Datos experimentales para rendimiento	80
Tabla 6. Variables medidas	81
Tabla 7. Datos experimentales y resultados obtenidos para la determinación de la densidad de las biopelículas.	81
Tabla 8. Datos experimentales y resultados del grado de hinchamiento.	82
Tabla 9. Datos experimentales y resultados de la pérdida de masa	83
Tabla 10. Datos experimentales de transmitancia y absorbancia	84
Tabla 11. Cálculo de las coordenadas tristímulo de la biopelícula G.1.	85
Tabla 12. Cálculo de las coordenadas tristímulo de la biopelícula G.2.	86
Tabla 13. Área de la sección transversal de las probetas evaluadas	92
Tabla 14. Resistencia a la tracción de las biopelículas por muestra y promedio grupal.	93
Tabla 15. Elongación a la rotura de las biopelículas por muestra y promedio grupal.	93
Tabla 16. Módulo de Young de las biopelículas por muestra y promedio grupal.	94
Tabla 17. Resultados del modelo matemático del diseño factorial 2 ¹ para las propiedades mecánicas de las biopelículas.	95

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de las etapas metodológicas necesarias para el trabajo de grado	30
Figura 2. Resultado de la identificación cualitativa del almidón mediante la prueba de Lugol ..	45
Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas durante el ensayo de tracción de las biopelículas G.1 y G.2.....	50
Figura 4. Montaje de las biopelículas durante el ensayo de tracción.	52
Figura 5. Biopelículas después del ensayo de tracción.....	53
Figura 6. Curvas de esfuerzo-deformación de las réplicas individuales del grupo G.1 (10 g de glicerina).	90
Figura 7. Curva promedio de esfuerzo-deformación del grupo G.1 (10 g de glicerina).	90
Figura 8. Curvas de esfuerzo-deformación de las réplicas individuales del grupo G.2 (20 g de glicerina).	91
Figura 9. Curva promedio de esfuerzo-deformación del grupo G.2 (20 g de glicerina).	91
Figura 10. Efecto de la concentración de glicerina sobre las propiedades mecánicas de las biopelículas.	97

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Procedimiento para la verificación cualitativa de almidón mediante la prueba de Lugol.	68
Apéndice B. Expresiones matemáticas para la caracterización mecánica de biopelícula.	68
Apéndice C. Ecuaciones matemáticas para la caracterización física de biopelículas.	69
Apéndice D. Expresiones matemáticas para la caracterización óptica de biopelículas.	71
Apéndice E. Comparación de los métodos de extracción de almidón empleada para la selección del método experimental.	75
Apéndice F. Análisis de las variedades de aguacate reportadas como fuente de almidón.	79
Apéndice G. Cálculo del contenido de humedad de la torta de almidón.	79
Apéndice H. Cálculo del rendimiento de extracción del almidón de semilla de aguacate.	80
Apéndice I. Cálculo de la densidad de las biopelículas.	81
Apéndice J. Cálculo del grado de hinchamiento de las biopelículas.	82
Apéndice K. Cálculo de la pérdida de masa soluble de las biopelículas.	83
Apéndice L. Cálculo de las propiedades ópticas de las biopelículas (absorbancia, transmitancia, luz retenida y opacidad).	84
Apéndice M. Cálculo de las propiedades colorimétricas de las biopelículas (X, Y, Z, L*, a*, b*, índice de amarillez, índice de blancura y diferencia total de color).	85

Apéndice N. Datos experimentales del ensayo de tracción obtenidos mediante la máquina universal de ensayos.	89
Apéndice O. Curvas esfuerzo-deformación de las biopelículas G.1.1, G.1.2, G.2.1 y G.2.2.	90
Apéndice P. Cálculo de las propiedades mecánicas de las biopelículas (resistencia a la tracción, elongación a la rotura y módulo de Young).	92
Apéndice Q. Modelo matemático asociado al diseño factorial 2^1 para la evaluación del efecto de la concentración de glicerina sobre las propiedades mecánicas de las biopelículas	94

Glosario

Absorbancia: Medida de la capacidad de una muestra para absorber luz a una longitud de onda determinada.

Almidón: Polímero natural compuesto por amilosa y amilopectina, presente en tejidos vegetales como granos, tallos y tubérculos. Constituye el biopolímero base empleado en la elaboración de las biopelículas de este trabajo.

Amilopectina: Fracción ramificada del almidón, presente entre el 70 % y el 85 % en la semilla de aguacate. Su proporción influye en el comportamiento del almidón durante los procesos de transformación y en las propiedades de los materiales derivados.

Amilosa: Fracción lineal del almidón, presente entre el 15 % y el 30 % en la semilla de aguacate. Junto con la amilopectina determina el comportamiento térmico y funcional del almidón.

Biopelícula: Material polimérico delgado y flexible elaborado a partir de biopolímeros de origen renovable como el almidón, la celulosa, el quitosano, proteínas naturales y derivados de aceites vegetales.

Biopolímero: Polímero de origen biológico o renovable. En este trabajo se emplean el almidón de semilla de aguacate, el ácido Poliláctico (PLA) y los polihidroxialcanoatos (PHA) como ejemplos de esta categoría.

Bisulfito de sodio: Agente antioxidante empleado durante el proceso de extracción húmeda del almidón para prevenir el pardeamiento oxidativo de la semilla de aguacate.

Carboximetilcelulosa (CMC): Polisacárido derivado de la celulosa empleado como agente estructurante dentro de la formulación filmogénica, con el fin de mejorar la cohesión y homogeneidad de la matriz polimérica.

Casting: Método de elaboración de biopelículas basado en el vaciado de una solución filmogénica en moldes, seguido de un proceso de secado controlado.

Coordenadas CIE L^* , a^* , b^* : Parámetros del sistema colorimétrico internacional que describen el color de un material: L^* representa la luminosidad, a^* la variación entre tonalidades verdes y rojas, y b^* la variación entre tonalidades azules y amarillas.

Diferencia total de color (ΔE^*): Parámetro colorimétrico que cuantifica la diferencia perceptible entre dos muestras. Valores superiores al umbral de percepción visual indican que las formulaciones son cromáticamente distinguibles a simple vista.

Diseño factorial 2¹: Diseño experimental que evalúa el efecto de un factor a dos niveles. En este trabajo se empleó para cuantificar el efecto de la concentración de glicerina sobre las propiedades mecánicas de las biopelículas.

Elongación a la rotura: Incremento porcentual de longitud que experimenta una muestra antes del fallo durante un ensayo de tracción. Refleja la flexibilidad del material.

Espesor: Dimensión transversal de la biopelícula, determinada mediante micrómetro en múltiples puntos de cada muestra. Parámetro de referencia para el cálculo de la resistencia a la tracción, la opacidad y otras propiedades de la biopelícula.

Gelatinización: Fenómeno hidrotérmico mediante el cual los gránulos de almidón se hinchan, pierden su estructura cristalina y forman una matriz viscosa al ser calentados en presencia de agua. Etapa fundamental en la elaboración de biopelículas por el método casting.

Glicerina: Plastificante hidrofílico de bajo peso molecular incorporado en la formulación filmogénica para incrementar la movilidad de las cadenas poliméricas y mejorar la flexibilidad de las biopelículas.

Grado de hinchamiento: Parámetro que cuantifica la capacidad de la biopelícula para absorber agua, relacionado con su naturaleza hidrofílica y con la presencia de grupos hidroxilo en las cadenas de almidón. Se determina mediante el método gravimétrico por inmersión.

Hidrogel: Material polimérico tridimensional con alta capacidad de absorción de agua. El comportamiento análogo al de un hidrogel observado en las biopelículas de este trabajo se evidencia por los valores de hinchamiento superiores al rango típico de biopelículas convencionales de almidón.

Índice de amarillez (YI): Parámetro colorimétrico que cuantifica la tendencia de un material hacia tonalidades amarillas, calculado a partir de las coordenadas tristímulo X, Y y Z del sistema CIE.

Índice de blancura (WI): Parámetro colorimétrico que indica el grado de blancura de un material, calculado a partir de las coordenadas L*, a* y b* del sistema CIE.

Método húmedo de extracción: Proceso de obtención de almidón basado en la suspensión del material molido en agua o solución química, seguido de etapas de filtración, sedimentación, lavados y secado controlado. Permite obtener un almidón de mayor pureza que el método seco.

Método seco de extracción: Proceso de obtención de almidón basado en la deshidratación y molienda directa de la semilla, seguido de clasificación granulométrica. Presenta mayor rendimiento que el método húmedo, pero genera un producto con mayor contenido de impurezas.

Módulo de Young: Parámetro mecánico que corresponde a la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación en la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación. Indica la rigidez del material.

Opacidad: Propiedad óptica que indica la capacidad de la biopelícula para bloquear el paso de luz. Se calcula como la relación entre la absorbancia y el espesor de la película.

Pardeamiento oxidativo: Fenómeno de oscurecimiento del almidón causado por la oxidación enzimática de compuestos fenólicos presentes en la semilla de aguacate, controlado mediante el uso de bisulfito de sodio durante el proceso de extracción.

Pérdida de masa soluble: Fracción del material de la biopelícula que se disuelve al contacto con agua durante el ensayo de hinchamiento. Indicador de la estabilidad estructural del material en medio acuoso.

Plastificante: Compuesto de bajo peso molecular incorporado en la formulación de biopelículas para reducir la rigidez de la matriz polimérica, aumentar la movilidad de las cadenas y mejorar la flexibilidad del material.

Polihidroxicanoatos (PHA): Biopolímeros producidos por bacterias a partir de fuentes renovables, con elevada biodegradabilidad y propiedades físicas comparables a ciertos polímeros sintéticos. Mencionados en el marco teórico como ejemplo de biopolímero de base biológica.

Prueba de Lugol: Prueba cualitativa basada en la adición de una solución de yodo a una muestra.

Residuo agroindustrial: Subproducto generado durante el procesamiento de productos agropecuarios que carece de aprovechamiento definido en la cadena productiva convencional. En este trabajo, la semilla de aguacate constituye el residuo agroindustrial valorizado.

Resistencia a la tracción: Tensión máxima que un material puede soportar antes de romperse durante un ensayo de tracción uniaxial. Parámetro fundamental para evaluar el desempeño estructural de las biopelículas.

Solución filmogénica: Mezcla homogénea de almidón, plastificante, agente estructurante y agua que, tras la gelatinización y el secado, da lugar a la formación de la biopelícula.

Tamizado: Operación unitaria empleada para clasificar partículas sólidas por tamaño mediante el uso de mallas normalizadas.

Transmitancia: Fracción de luz que atraviesa una muestra respecto a la luz incidente, expresada en porcentaje. Parámetro empleado para evaluar las propiedades ópticas y de barrera lumínica de las biopelículas.

Variedad Lorena (papelillo): Variedad de aguacate de raza Antillana, ampliamente cultivada en Colombia y específicamente en la región de Santander. Constituye la materia prima de este trabajo por su alto contenido de almidón en la semilla.

Resumen

Título: Elaboración de una biopelícula a partir de la semilla de aguacate cultivada en la región de Santander*

Autor: Valentina Meneses Mendoza, Katherine Nicolle Sarmiento Coy**

Palabras Clave: Biopelícula, almidón, semilla de aguacate, glicerina, propiedades mecánicas, papelillo.

Descripción: El presente trabajo tuvo como objetivo elaborar una biopelícula a partir del almidón extraído de la semilla de aguacate variedad Lorena (papelillo), cultivada en la región de Santander, Colombia, analizando sus propiedades físicas y su viabilidad como alternativa sostenible a los plásticos convencionales. Mediante revisión bibliográfica se seleccionó el método húmedo de extracción por producir un almidón de mayor pureza, condición necesaria para obtener una matriz filmogénica continua y homogénea. El proceso de extracción se llevó a cabo bajo condiciones experimentales controladas, obteniendo un rendimiento del 2.22% y un contenido de humedad de 64.33 % en la torta húmeda; la presencia del almidón fue confirmada mediante la prueba de Lugol. Las biopelículas se elaboraron por el método casting empleando dos formulaciones con diferente concentración de glicerina como plastificante (G.1 y G.2) y carboximetilcelulosa (CMC) como agente estructurante. La caracterización incluyó pruebas de tensión, densidad, hinchamiento, color y opacidad. G.1 presentó una resistencia a la tracción de 3.21 MPa, elongación del 31.12 % y módulo de Young de 170.75 MPa, mientras que G.2 registró 0.97 MPa, 35.20 % y 17.54 MPa respectivamente. El grado de hinchamiento fue de 1551.78 % para G.1 y 1660.97 % para G.2, valores que superan el rango típico de biopelículas de almidón convencionales, evidenciando comportamiento análogo al de un hidrogel. La pérdida de masa soluble fue de 38.75 % y 47.83 % para G.1 y G.2 respectivamente. Ambas formulaciones presentaron baja transmitancia, lo que indica propiedades de barrera lumínica adecuadas para la protección de productos fotosensibles. Los resultados indican que G.1 tiene potencial de aplicación como material de empaque en ambientes secos de baja exigencia mecánica, mientras que la alta hidrofilia de ambas formulaciones limita su uso en contacto con agua o ambientes de alta humedad.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Mg. Cesar Augusto Guevara Lastre, Codirector: Mg. Javier Enrique Gómez Ramírez.

Abstract

Title: Production of a Biofilm from Avocado Seeds Grown in the Santander Region*

Authors: Valentina Meneses Mendoza, Katherine Nicolle Sarmiento Coy**

Keywords: Biofilm, starch, avocado seed, glycerin, mechanical properties, papelillo.

Description: The objective of this study was to develop a biofilm from starch extracted from the seeds of the Lorena variety of avocado (papelillo), grown in the Santander region of Colombia, and to analyze its physical properties and its viability as a sustainable alternative to conventional plastics. Based on a literature review, the wet extraction method was selected because it produces starch of higher purity, a necessary condition for obtaining a continuous and homogeneous film-forming matrix. The extraction process was carried out under controlled experimental conditions, yielding a recovery rate of 2.22% and a moisture content of 64.33% in the wet cake; the presence of starch was confirmed using the Lugol's test. The biofilms were prepared by the casting method using two formulations with different concentrations of glycerin as a plasticizer (G.1 and G.2) and carboxymethylcellulose (CMC) as a structuring agent. Characterization included tests for tensile strength, density, swelling, color, and opacity. G.1 exhibited a tensile strength of 3.21 MPa, an elongation of 31.12%, and a Young's modulus of 170.75 Mpa, while G.2 recorded 0.97 Mpa, 35.20%, and 17.54 Mpa, respectively. The degree of swelling was 1551.78% for G.1 and 1660.97% for G.2, values that exceed the typical range for conventional starch biofilms, indicating behavior analogous to that of a hydrogel. The loss of soluble mass was 38.75% and 47.83% for G.1 and G.2, respectively. Both formulations exhibited low transmittance, indicating light-barrier properties suitable for protecting photosensitive products. The results suggest that G.1 has potential for use as a packaging material in dry environments with low mechanical demands, while the high hydrophilicity of both formulations limits their use in contact with water or in high-humidity environments.

*Bachelor thesis

**Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Mg. Cesar Augusto Guevara Laestre, Codirector: Mg. Javier Enrique Gómez Ramírez.

Introducción

La transición hacia materiales de menor impacto ambiental es hoy una prioridad en distintos sectores productivos, motivada por la necesidad de reducir la dependencia de los plásticos convencionales y mitigar sus efectos sobre los ecosistemas. En este ámbito, el aprovechamiento de residuos agroindustriales como fuente de biopolímeros ha cobrado relevancia, pues permite atender simultáneamente dos retos: la disposición inadecuada de subproductos agrícolas y la necesidad de desarrollar alternativas renovables a los empaques convencionales.

Santander es una región con una producción significativa de aguacate, cultivo cuya cadena de valor se concentra casi por completo en el aprovechamiento de la pulpa, dejando la semilla —que representa cerca del 15 % del peso del fruto en la variedad Lorena como residuo sin un uso definido, pese a su viabilidad como fuente almidón según indica Rengifo Reyes y Téllez Espinosa (2023). La obtención de almidón de semilla de aguacate y su transformación en biopelículas ha sido documentada previamente: estudios como el de Santiago-Adame y Velásquez (2022) caracterizaron almidón de semilla de aguacate Hass para la elaboración de biofilms, Tesfaye y otros (2018) extrajeron y caracterizaron almidón de semilla de aguacate con fines textiles. En Colombia, Rengifo Reyes y Téllez Espinoza (2023) desarrollaron una biopelícula a partir de almidón de semilla de aguacate variedad Lorena (papelillo), evaluando rendimiento, humedad, cenizas y la prueba de yodo como pruebas de caracterización del almidón; sin embargo, las semillas empleadas se obtuvieron de establecimientos comerciales en Bogotá, sin especificar su procedencia de cultivo, y la caracterización del almidón no incluyó un análisis fisicoquímico más profundo (térmico o estructural).

En consecuencia, hasta donde permite establecer la literatura revisada, no se han reportado estudios que caractericen en detalle el almidón de semilla de aguacate papelillo específicamente cultivado en la región de Santander, ni que evalúen las propiedades mecánicas, ópticas y de estabilidad de la biopelícula obtenida a partir de este material. Esta carencia limita el aprovechamiento de un recurso disponible localmente y representa una oportunidad para generar conocimiento original que respalde el desarrollo de empaques biodegradables a partir de materia prima regional.

El presente trabajo tuvo como finalidad la elaboración de una biopelícula a partir de la semilla de aguacate de la región de Santander, analizando sus propiedades físicas y su viabilidad como alternativa sostenible a los plásticos convencionales. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica en la cual se determinaron los métodos de extracción más adecuados para el almidón de la semilla de aguacate, aplicándolos a condiciones experimentales controladas en escala de laboratorio en la Universidad Industrial de Santander, para finalmente obtener y caracterizar la biopelícula mediante pruebas mecánicas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general:

Elaborar una biopelícula a partir de la semilla de aguacate de la región de Santander, analizando sus propiedades físicas y su viabilidad técnica como alternativa sostenible a los plásticos convencionales.

1.2 Objetivos específicos:

- 1.2.1 Seleccionar mediante revisión bibliográfica la técnica de extracción del almidón de la semilla aguacate.
- 1.2.2 Extraer almidón de la semilla de aguacate bajo condiciones experimentales controladas.
- 1.2.3 Caracterizar la biopelícula obtenida mediante pruebas mecánicas.

2. Marco teórico

2.1 Biopelículas

Son materiales poliméricos delgados y flexibles, elaborados a partir de biopolímeros renovables como el almidón, la celulosa, el quitosano, ciertas proteínas naturales y derivados de aceites vegetales; estos se proponen como una alternativa a los plásticos convencionales (Pérez Delgado & Hoyos Conde, 2025). Debido a su capacidad para actuar como barrera frente al paso de agua, gases y solutos, controlan procesos como la oxidación y la deshidratación, razón por la cual son empleados en recubrimientos y empaques, especialmente para la industria alimentaria (Merino, y otros, 2021; Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023).

Dentro de los biopolímeros más utilizados para la obtención de biopelículas y se destacan el ácido Poliláctico (PLA), los polihidroxialcanoatos (PHA) y el almidón (Insights, 2026). El PLA se caracteriza por su compostabilidad y versatilidad de procesamiento para obtener materiales con propiedades mecánicas reproducibles (Montañez Cervantes, 2022). Los PHA, producidos por bacterias, son altamente biodegradables y poseen propiedades físicas comparables con polímeros sintéticos (Valero-Valdivieso, Ortégón, & Uscategui, 2013). Por su parte, el almidón se emplea por su abundancia, bajo costo y capacidad para formar matrices continuas; aunque requieren la incorporación de plastificantes para mejorar su flexibilidad y estabilidad estructural (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023; de Dios-Avila, 2022).

2.2 Composición química de la semilla del aguacate

La semilla constituye alrededor del 15 % del peso total del fruto y representa un residuo agroindustrial con alto potencial de valorización por su disponibilidad y

composición química, permitiendo su aprovechamiento como materia prima para obtener biopolímeros (Pérez Delgado & Hoyos Conde, 2025; Mendoza Chipantasi, 2021).

Composicionalmente, esta se caracteriza por un contenido de almidón superior al 60 %, conformado por amilosa y amilopectina, cuyas proporciones varían según la variedad del aguacate, las condiciones de cultivo, el tipo de suelo y el grado de madurez del fruto (Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021). En términos generales, la amilosa representa entre el 15 % y el 30 %, mientras que la amilopectina se encuentra en un rango del 70 % al 85 %, relación que influye en el comportamiento del almidón durante los procesos de transformación y en las propiedades de los materiales derivados (Montañez Cervantes, 2022). Además, presenta un 10 % de proteínas, bajos niveles de lípidos y cenizas, así como compuestos fenólicos, celulosa y lignina, componentes que influyen en la extracción del almidón y en el desempeño de los materiales obtenidos (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023).

2.3 Extracción del almidón

El proceso consiste en separar los gránulos contenidos en la matriz vegetal de la semilla, eliminando componentes como fibras, proteínas, lípidos, compuestos fenólicos e impurezas. Esto se logra con operaciones mecánicas y etapas de separación física basadas en diferencias de tamaño y densidad, cuya eficiencia depende de la composición de la materia prima y de las condiciones operativas (Mendoza Chipantasi, 2021; Montañez Cervantes, 2022).

La obtención del almidón puede realizarse por vía húmeda o por vía seca. El método húmedo se basa en la suspensión del material molido en agua, seguida de etapas de filtración, sedimentación o centrifugación, con lavados y secados controlados, permitiendo

obtener un almidón de mayor pureza, pero con menor rendimiento. En contraste, el método seco emplea procesos de deshidratación y molienda, seguidos de clasificación granulométrica, lo que simplifica el proceso y reduce costos, aunque genera un producto con mayor contenido de impurezas (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023).

2.4 Elaboración de biopelículas a partir de almidón y uso de plastificantes

La elaboración de una biopelícula a base de almidón se fundamenta en la capacidad de este polisacárido para formar una matriz continua cuando se dispersa en agua y se somete a calentamiento. En estas condiciones, los gránulos se hidratan, se hinchan y pierden parcialmente su orden interno, lo que favorece la liberación e interacción de las cadenas poliméricas. Durante el secado, la eliminación progresiva del agua conduce a la reorganización de dichas cadenas y a la estabilización de una estructura cohesionada. Dado que el almidón tiende a originar materiales rígidos, se incorporan plastificantes como el agua y la glicerina, los cuales, por su bajo peso molecular, aumentan la movilidad de la matriz y mejoran la flexibilidad del material. (Mendoza Chipantasi, 2021)

La obtención puede realizarse mediante distintos métodos, entre los que destacan el vaciado en placa (*casting*) y la extrusión. El método *casting* es el más utilizado a nivel de laboratorio debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad para obtener láminas delgadas y relativamente homogéneas, aunque presenta tiempos de secado prolongados y tienen un riesgo de agrietamiento (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023). En contraste, la extrusión se emplea principalmente a escala industrial, ya que permite la producción continua de biopelículas mediante la aplicación simultánea de calor y cizallamiento (Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021).

2.5 Propiedades y caracterización de biopelículas

Las propiedades mecánicas describen el comportamiento de los materiales frente a la aplicación de esfuerzos externos y permiten evaluar su resistencia, flexibilidad y rigidez (Askeland & Wright, 2017). En el caso de las biopelículas, estas propiedades son determinantes para analizar su desempeño estructural y su viabilidad como materiales alternativos a los plásticos convencionales, especialmente en aplicaciones de recubrimiento y empaque (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023). Su caracterización se realiza mediante ensayos de tracción uniaxial desarrollados bajo condiciones controladas y conforme a normas técnicas internacionales como ASTM D882, ISO 527-3 y NTC 942:2020 (ICONTEC), lo que garantiza la obtención de resultados confiables y comparables (Organización Internacional de Normalización, 2018; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020; ASTM International, 2018).

A partir de estos ensayos se determinan parámetros fundamentales como la resistencia a la tracción, definida como la tensión máxima que un material puede soportar antes de romperse; la elongación a la rotura, que expresa el incremento porcentual de longitud que experimenta la muestra antes del fallo y refleja la flexibilidad del material; y el módulo de elasticidad, que corresponde a la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación en la zona elástica, indicando la rigidez del sistema (Askeland & Wright, 2017). En conjunto, estos parámetros permiten evaluar el efecto del biopolímero, del contenido de plastificante y de las condiciones de elaboración sobre el comportamiento mecánico de las biopelículas (Montañez Cervantes, 2022).

3. Estado del arte

La semilla de aguacate (*Persea americana* Mill.) es uno de los principales residuos agrícolas generados debido al uso del aguacate como alimento humano. En la cadena productiva del aguacate, la semilla se descarta deliberadamente como residuo sin aprovechamiento, representando una fracción significativa del volumen total de desecho generado por la industria. (Tesfaye, y otros, 2018); (Wang, Li, Jin, & Cheng, 2022). Se caracteriza por tener una composición con alto contenido de almidón, con rendimientos de extracción reportados superiores al 60 % en base seca (Tesfaye, y otros, 2018). Wang, Li, Jin y Cheng (2022) al comparar una pequeña variedad de semilla de aguacate (entre ellos Hass, Reed, Zutano y Pinkerton), encontraron que todos presentaron un contenido de almidón resistente superior al 60 %, con el valor máximo registrado en la variedad Hass (77.83 %), lo que confirma el potencial de este residuo no solo como fuente de biopolímero estructural, sino también como material de interés nutricional.

Para la extracción del almidón se han documentado principalmente dos métodos. El método húmedo, que tritura la semilla en presencia de agua o de una solución antioxidante (bisulfito o metabisulfito de sodio) para evitar el pardeamiento enzimático, es el más utilizado en la literatura por preservar mejor la integridad del gránulo (Chel-Guerrero, Barbosa-Martín, Martínez-Antonio, Gonzalez, & Betancur-Ancona, 2016); (Jiménez, y otros, 2022). El método seco, en cambio, se basa en el secado y la molienda directa de la semilla, siendo menos frecuente por generar mayor degradación térmica del material. Los rendimientos reportados varían considerablemente según las condiciones experimentales: Alemu, Balakrishman y Debtera (2022) obtuvieron un $18.3 \% \pm 0.02 \%$ de almidón mediante extracción húmeda combinada con caracterización por FTIR, DSC,

SEM, XRD, reometría y RVA, mientras que en Colombia, Monguí Torres y Quintero Calderón (2021) reportaron apenas un 2 % de rendimiento al trabajar con las variedades Fuerte, Lorena y Criolla, verificando la presencia de almidón mediante el reactivo de Lugol —solución de yodo—. Esta diferencia, sugiere que factores como el estado de madurez de la semilla, el tiempo de secado y la relación sólido-solvente influyen tanto o más que la variedad sobre el rendimiento final, lo que será un parámetro clave a controlar en la fase experimental de este trabajo.

La variedad del aguacate y el origen del cultivo modifican de forma considerable las propiedades fisicoquímicas del almidón obtenido. Wang, Li, Jin y Cheng (2022) determinaron que el contenido aparente de amilosa varía significativamente entre tipos de cultivo, mientras que los análisis de XRD y FTIR mostraron una estructura cristalina y enlaces químicos relativamente similares entre las variedades estudiadas; las diferencias más marcadas se presentaron en las propiedades de empastado, la solubilidad en agua y el comportamiento térmico. De Dios-Avila (2022), comparó almidón de aguacate criollo (landrace) frente a Hass, reportaron un contenido de amilosa más alto en los almidones que en las harinas (42.25–48.2 %), una entalpía de gelatinización de 1.82–13.43 J/g, mientras que las harinas presentaron una temperatura de gelatinización más alta ($T_p = 73.17\text{--}73.62$ °C). Alemu, Balakrishnan y Debtera (2022) por su parte, identificaron picos de difracción característicos a 5.64° , 17.30° , 19.62° , 22.3° y 34.42° , atribuidos a una estructura cristalina relativamente alta asociada a cadenas ricas en amilopectina. En conjunto, estos resultados confirman que ni la estructura cristalina general ni los grupos funcionales del almidón de aguacate cambian drásticamente entre variedades, pero sí lo hacen propiedades funcionales determinantes para su procesamiento —temperatura de gelatinización, entalpía y

comportamiento de empastado—, lo cual constituye la base científica para esperar un comportamiento particular en el almidón de la variedad papelillo cultivada en Santander.

El método de vaciado en placa (*casting*) es la técnica predominante para la elaboración de biopelículas de almidón de semilla de aguacate, generalmente plastificadas con glicerol Jiménez, Zambrano y Maza (2021) elaboraron biofilms de almidón Hass por *casting*, secando a 40 °C durante 24 horas, sin encontrar diferencias estructurales significativas frente a formulaciones con PLA según FTIR y SEM (Sartika, Lubis, Harahap, Afrida, & Ginting, 2018) (Nguyen, Duy, & Xuyen, 2024). Por su parte, Regifo Reyes y Téllez Espinoza (2023), trabajando específicamente con almidón de semilla de aguacate papelillo, reportaron resistencias a la tracción de 8.55 N/mm² y 7.85 N/mm² en sus mejores formulaciones, valores que servirán como referencia comparativa directa para los resultados de este trabajo.

En Colombia, los antecedentes disponibles sobre almidón de semilla de aguacate son limitados y se concentran en dos trabajos de grado. Regifo Reyes y Téllez Espinoza (2023) elaboraron una biopelícula a partir de la variedad Lorena (papelillo) con semillas obtenidas de un establecimiento comercial en Bogotá, utilizando el método de *casting* con glicerol como plastificante, ácido cítrico y ácido acético, caracterizaron el almidón mediante pruebas de humedad, rendimiento, cenizas y prueba de yodo. Mongui Torres y Quintero Calderón (2021) en la Universidad Distrital, compararon las variedades Fuerte, Lorena y Criolla, verificando la presencia de almidón con reactivo de Lugol, aunque orientaron su trabajo hacia la obtención de un termoplástico por extrusión más que hacia la elaboración de la biopelícula por *casting*. En la región andina Chapuel y Reyes (2019),

en Ecuador, combinaron almidón de aguacate y de banano para el recubrimiento de papaya, evaluando solubilidad, espesor y pérdida de masa.

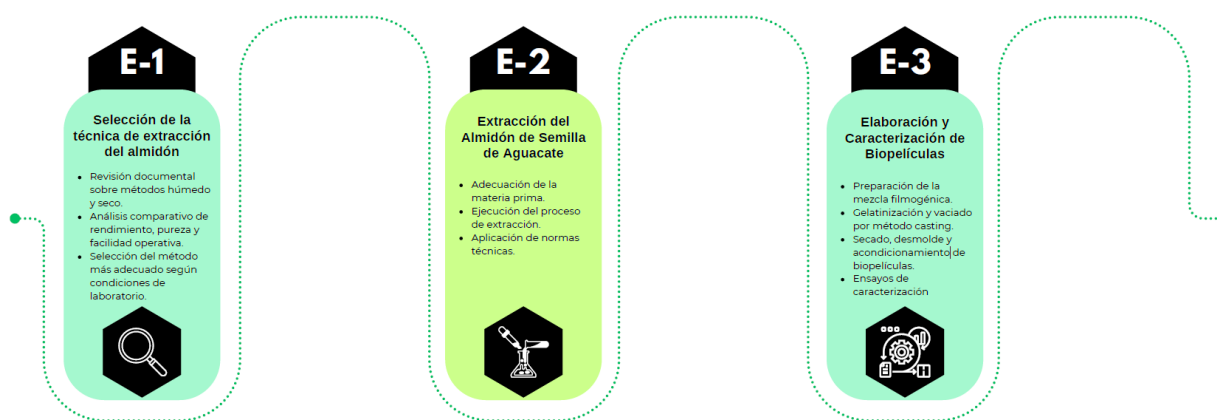
A diferencia de los antecedentes mencionados, el presente trabajo se caracterizan las biopelículas obtenidas mediante pruebas de tensión, densidad, hinchazón, color y opacidad, propiedades que los estudios previos no abordaron de manera conjunta para esta variedad cultivada específicamente en la región de Santander, lo que genera una oportunidad de investigación que este trabajo busca abordar sobre el desempeño funcional de la biopelícula.

4. Metodología

A continuación, en la *figura 1* se presenta el diagrama que resume el procedimiento metodológico desarrollado en el presente trabajo, en el cual se incorporan las actividades realizadas para el cumplimiento de los objetivos planteados:

Figura 1.

Diagrama de las etapas metodológicas necesarias para el trabajo de grado



4.1 Selección de la Técnica de Extracción del Almidón de la Semilla de Aguacate

4.1.1 Revisión documental sobre los métodos húmedo y seco

La revisión se desarrolló para identificar, analizar y comprender los principales métodos reportados para la extracción de almidón. Para ello, se consultaron artículos científicos, trabajos de investigación y documentos técnicos, a partir de los cuales se analizaron los principios de funcionamiento de los métodos de extracción por vía húmeda y por vía seca, así como las condiciones de operación y las variables que influyen en su desempeño. En este análisis se tuvieron en cuenta múltiples criterios de comparación, incluyendo el rendimiento del proceso, la pureza del almidón obtenido y la facilidad operativa, así como aspectos relacionados con el consumo de agua y

energía, el número de etapas involucradas, el riesgo de pardeamiento, el uso de reactivos químicos, los requerimientos de equipo y la calidad final del producto para aplicaciones posteriores. Esta revisión permitió establecer los fundamentos técnicos para sustentar el análisis comparativo entre los métodos y orientar la toma de decisiones.

4.2 Extracción del Almidón de la Semilla de Aguacate

4.2.1 *Adecuación de la materia prima*

La materia prima fue sometida a un proceso de adecuación con el propósito de garantizar condiciones homogéneas de procesamiento, reducir la presencia de impurezas y facilitar la liberación del almidón en las subetapas posteriores. Para ello, se emplearon semillas de aguacate de la variedad previamente seleccionada, las cuales fueron sometidas a un conjunto de operaciones preliminares de acondicionamiento físico.

Inicialmente, las semillas fueron sometidas a un lavado con agua potable, con el fin de eliminar residuos de pulpa adherida y material particulado externo. Posteriormente, se dejaron secando durante cinco (5) días a temperatura ambiente, con el objetivo de reducir parcialmente su contenido de humedad y facilitar la remoción de la cubierta externa.

Una vez finalizado el secado, se procedió al descascarillado manual, retirando la capa externa hasta obtener el núcleo de la semilla. Durante esta operación se realizó la selección de las pepas de aguacate, descartando aquellas que presentaban signos de deterioro o contaminación, ya que estas características solo fueron evidentes tras la remoción de la cáscara. Posteriormente, las pepas descascarilladas fueron sometidas a

un lavado con agua destilada, para eliminar posibles residuos que pudieran interferir en el proceso de extracción o afectar la pureza del almidón.

Para prevenir el fenómeno de pardeamiento oxidativo, característico de la semilla de aguacate debido a la presencia de compuestos fenólicos, se implementó un control previo mediante la preparación de una solución acuosa con bisulfito de sodio. El volumen de agua destilada requerido para la extracción fue calculado en función de la relación agua: semilla (2:1), a la cual se le adicionó la cantidad correspondiente de bisulfito de sodio (10 g por cada kilogramo de semilla). Esta solución se preparó antes del corte de la materia prima, de manera que los fragmentos de semilla fueran incorporados inmediatamente al medio antioxidante, minimizando así la oxidación enzimática.

Las semillas acondicionadas fueron cortadas en fragmentos de tamaño reducido, con el fin de aumentar el área superficial disponible y facilitar la eficiencia de las operaciones de licuado. Seguido de esto, dichos fragmentos fueron incorporados de forma inmediata a la solución acuosa previamente preparada con bisulfito de sodio. En esta subetapa se adecuaron aproximadamente 4400 g de materia prima recolectada; sin embargo, cerca de 2300 g fueron destinados al proceso de extracción de almidón, una vez concluido el acondicionamiento y la selección de las semillas aptas para el procesamiento, quedando listas para su procesamiento en las operaciones subsiguientes.

4.2.2 Ejecución del proceso de extracción.

Las fracciones de semilla previamente acondicionadas fueron sometidas a molienda húmeda en licuadora durante 2 minutos, hasta obtener una mezcla

homogénea que facilitara la liberación del almidón presente en la matriz vegetal. Posteriormente, el material procesado fue filtrado utilizando tela de muselina, permitiendo separar el bagazo de la suspensión rica en almidón. El residuo sólido retenido fue lavado adicionalmente con aproximadamente 200 mL de agua destilada, para recuperar el almidón adherido a la fibra.

Seguido de esto, el material filtrado fue sometido a ciclos de sedimentación y decantación dejando el sistema en reposo durante 3 a 4 horas para favorecer la separación sólido-líquido. Durante esta operación se realizaron lavados sucesivos, hasta evidenciar una disminución de las tonalidades amarillentas presentes en el agua de lavado y obtener una apariencia más clara del sistema, indicando la remoción progresiva de compuestos residuales e impurezas asociadas a la suspensión.

Una vez finalizada la etapa de purificación, la fase líquida fue retirada cuidadosamente mediante pipeteo, evitando alterar el sedimento de almidón. El material húmedo fue sometido a ciclos de secado en horno de convección forzada (*Binder, modelo FD 115*) a 65 °C, por un tiempo total de 43 horas.

Posteriormente, el almidón seco fue triturado de manera manual utilizando un mortero hasta obtener un material pulverizado. El producto obtenido fue tamizado mediante de mallas No. 100 y 120 empleando un vibrador para tamices (*Tamices Francisco, referencia CL 313 F*). Debido a que la fracción retenida en ambas mallas continuaban correspondiendo a partículas de almidón, esta fue sometida nuevamente a etapas de trituración y tamizado, con el propósito de maximizar la recuperación y obtener un polvo homogéneo con menor tamaño de partícula.

Finalmente, la presencia de almidón en el material obtenido fue verificada mediante la prueba de Lugol. El desarrollo de esta prueba se presenta en el *Apéndice A*. Una vez finalizada la prueba, el almidón fue almacenado en condiciones herméticas a temperatura ambiente, con el fin de preservar sus propiedades físicas y evitar la absorción de humedad antes de su utilización en la elaboración de las biopelículas.

4.2.3 Aplicación de normas técnicas

Con el propósito de estandarizar las condiciones experimentales y disponer de criterios de referencia para la evaluación de la materia prima y del almidón obtenido, durante el desarrollo del proyecto se tomaron como base diferentes normas técnicas nacionales e internacionales relacionadas con productos amiláceos y materias primas de origen vegetal.

Para la selección de la materia prima se consideraron los lineamientos establecidos en la *NTC 5209*, correspondiente a aguacates frescos, la cual establece criterios de calidad para el fruto (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2003). Aunque esta norma está orientada principalmente al aguacate destinado al consumo, sus especificaciones sirvieron como referencia para emplear semillas provenientes de frutos con un adecuado estado de madurez y sin deterioro visible. Como se mencionó previamente, se realizó una selección de las semillas en buen estado, con el fin de garantizar una materia prima homogénea para el proceso de extracción.

La determinación del contenido de humedad del almidón obtenido se realizó tomando como referencia la *ISO 1666:1996*, norma empleada para la evaluación de materiales amiláceos (Organización Internacional de Normalización, 1996). Para ello,

se registró la masa de la torta húmeda antes del secado y la masa del material seco después de su permanencia en horno, calculando el porcentaje de humedad mediante la ecuación:

$$\%H = \frac{W_{TH} - W_{TS}}{W_{TH}} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde H corresponde al contenido de humedad (%), W_{TH} representa la masa de la torta húmeda y W_{TS} la masa de la torta seca obtenida después del secado. Adicionalmente, el rendimiento de extracción fue determinado a partir de la relación entre la masa final de almidón obtenida después del tamizado y la masa inicial de materia prima empleada en la extracción, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\%R = \frac{P_{FAO}}{P_{IMP}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde (R) corresponde al rendimiento de extracción (%), (PFAO) es el peso final del almidón obtenido después del tamizado y (PIMP) representa el peso inicial de la materia prima utilizada en el proceso.

Asimismo, el tamizado del almidón obtenido se realizó empleando tamices normalizados de acuerdo con la *ASTM E11*, norma que establece las especificaciones dimensionales y las tolerancias permitidas para mallas utilizadas en la clasificación granulométrica de materiales sólidos (ASTM International, 2024). La aplicación de esta norma permitió garantizar la uniformidad del tamaño de partícula del almidón recuperado, favoreciendo la reproducibilidad del proceso y la obtención de un material con características adecuadas para las etapas posteriores de elaboración de biopelículas.

Finalmente, se consideró la *NTC 6066:2014* como norma de referencia para la caracterización de productos amiláceos en Colombia (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2014). En este contexto, la identificación cualitativa del almidón extraído se complementó mediante la prueba de coloración yodométrica realizada durante el proceso de extracción, empleada como criterio de verificación de la presencia de almidón en las muestras obtenidas.

4.3 Elaboración y Caracterización de Biopelículas

4.3.1 Preparación de la mezcla filmogénica

Con el fin de obtener una matriz filmogénica adecuada para la formación de biopelículas, se prepararon formulaciones a base de almidón de semilla de aguacate, carboximetilcelulosa (CMC), glicerina, agua destilada y una solución ajustada a pH 5 compuesta por ácido acético, ácido cítrico e hidróxido de sodio. Todas las formulaciones fueron preparadas bajo una relación peso a peso (p/p). La selección de estos componentes se realizó considerando su función dentro de la matriz polimérica, donde el almidón actuó como biopolímero base, la glicerina como plastificante, el CMC como agente estructurante y la solución ajustada a pH 5 como medio para mantener las condiciones de acidez requeridas y aportar compuestos con efecto conservante y antioxidante dentro de la formulación.

Para evaluar el efecto del plastificante sobre las propiedades de las biopelículas obtenidas, se planteó un diseño factorial 2^1 , en el cual el factor de estudio correspondió a la cantidad de glicerina incorporada en la formulación, estableciendo dos niveles de

concentración de 10 g y 20 g, mientras que las demás condiciones de preparación permanecieron constantes entre las formulaciones evaluadas.

Inicialmente, se pesaron (*balanza analítica Radwag, modelo AS 220.R2*) 0.72 g de CMC, 9 g de almidón, 55 g de solución ajustada a pH 5, 73 g de agua destilada y la cantidad de glicerina correspondiente a cada formulación. Posteriormente, el CMC fue incorporado al agua destilada y sometido a una agitación magnética de 500 rpm hasta obtener una mezcla homogénea.

Una vez alcanzada esta condición, se adicionaron la glicerina, la solución ajustada a pH 5 y el almidón, incorporando inicialmente los componentes líquidos y posteriormente el componente sólido. La mezcla fue mantenida bajo agitación constante a 400 rpm durante aproximadamente 15 minutos, hasta obtener una suspensión homogénea y libre de aglomerados, adecuada para la etapa posterior de gelatinización.

4.3.2 Gelatinización y vaciado por método casting.

Una vez obtenida la suspensión homogénea, la mezcla fue sometida a un proceso de gelatinización mediante calentamiento controlado sobre una plancha con agitación magnética (*SCILOGEX, modelo SCI380HS-Pro*) constante de 400 rpm. El calentamiento se mantuvo hasta alcanzar una temperatura de 85 °C, condición en la que se observó el inicio de la gelatinización del almidón, evidenciada por el cambio en la consistencia de la mezcla. Durante esta etapa se procuró mantener una distribución uniforme del calor con el fin de favorecer la transformación estructural de los gránulos de almidón y evitar la formación de aglomerados.

Posteriormente, la mezcla gelatinizada fue vertida en moldes de silicona mediante el método casting. Para ello, el material fue transferido cuidadosamente utilizando una jeringa, permitiendo distribuir la suspensión de manera uniforme sobre toda la superficie del molde y favoreciendo la formación de una película continua.

4.3.3 *Secado, desmolde y acondicionamiento de biopelículas.*

Tras completar la etapa de vaciado, los moldes que contenían la mezcla filmogénica fueron introducidos en un horno a una temperatura de 40 °C durante 24 horas. Esta etapa tuvo como finalidad promover la evaporación gradual del agua presente en la formulación y favorecer la formación de una película continua y estructuralmente estable. Se empleó un horno de convección forzada (*Binder, modelo FD 115*) debido a su capacidad para proporcionar un control más preciso y uniforme de la temperatura en comparación con los hornos de convección natural. Durante el secado se procuró mantener condiciones operativas estables que permitieran una evaporación uniforme del agua y contribuyeran a minimizar la aparición de agrietamientos, deformaciones e irregularidades en la superficie de las biopelículas.

Cumplido el tiempo de secado, las biopelículas fueron retiradas del equipo y dejadas a temperatura ambiente hasta alcanzar condiciones adecuadas para su manipulación. Seguido de esto, se realizó el desmolde de manera manual y cuidadosa, con el propósito de evitar rupturas, deformaciones o daños en la estructura de las películas obtenidas.

Finalmente, las biopelículas fueron almacenadas en bolsas herméticas para minimizar la absorción de humedad del ambiente y preservar sus propiedades físicas hasta la realización de los ensayos de caracterización mecánica.

4.3.4 Ensayos de caracterización

Con el fin de evaluar las propiedades del material obtenido, se realizaron ensayos de caracterización mecánica, física y óptica sobre las biopelículas elaboradas. Las propiedades mecánicas, correspondientes a la resistencia a la tracción, la elongación a la rotura y el módulo de Young, se determinaron mediante ensayos de tensión realizados en una *Tensile Testing Machine* modelo KJ-10065A, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D882 para películas plásticas delgadas (ASTM International, 2018). Previamente, el espesor de las biopelículas se determinó mediante un micrómetro (*medidor de espesores 0–10 mm, tipo rodillo*), efectuando mediciones en diferentes puntos de cada muestra y calculando el valor promedio obtenido, de acuerdo con los criterios establecidos en las normas ASTM D6988, ISO 4593 y NTC 4022 (ASTM International, 2021; Organización Internacional de Normalización, 1993; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1996). Este valor fue empleado para calcular el área transversal de cada muestra, utilizada para la determinación de la resistencia a la tracción, la elongación a la rotura y el módulo de Young, calculados las expresiones matemáticas presentadas en el *Anexo B*. Estos ensayos permitieron determinar el comportamiento mecánico de las biopelículas frente a esfuerzos de tracción y evaluar su capacidad de deformación y rigidez.

La caracterización física incluyó la determinación de la densidad mediante el método de desplazamiento de líquido descrito en la norma ASTM D792 (ASTM International, 2020). Para ello, se registró la masa de cada muestra en aire y sumergida en agua destilada, obteniendo la gravedad específica y la densidad. Asimismo, se determinó el grado de hinchamiento mediante inmersión en agua destilada bajo

condiciones controladas, siguiendo los criterios establecidos en las normas ASTM D570 e ISO 62 (ASTM International, 2022; Organización Internacional de Normalización, 2008). Para esto, se registró la masa seca inicial, la masa húmeda tras la inmersión y la masa seca final, calculando el porcentaje de hinchamiento real y la pérdida de masa soluble (ver en el *Anexo C*). Estos ensayos permitieron evaluar la absorción de agua, la estabilidad estructural y la fracción de material soluble presente en las biopelículas.

La caracterización óptica se realizó mediante espectrofotometría UV-Vis (*espectrofotómetro ZUZI, modelo 4201/20*). La opacidad se determinó a partir de los valores de absorbancia obtenidos a 600 nm, siguiendo la metodología propuesta para películas biodegradables elaboradas a partir de almidón de semilla de aguacate y aceites esenciales (Quispe-Sánchez, Mena-Chacón, Oblitas-Delgado, Meléndez-Mori, & Oliva-Cruz, 2026). Adicionalmente, el color de las biopelículas se evaluó según las normas ASTM E1164 y ASTM E308 (ASTM International, 2023; ASTM International, 2022). Para ello, se realizó un barrido espectral entre 350 y 1000 nm con intervalos de 10 nm, obteniendo los valores de absorbancia necesarios para el análisis colorimétrico. A partir de estos datos se determinaron el porcentaje de transmitancia, el porcentaje de luz retenida, las coordenadas tristímulo X, Y y Z, las coordenadas CIE L^* , a^* y b^* , el índice de amarillez (YI), el índice de blancura (WI) y la diferencia total de color (ΔE^*), las expresiones matemáticas están en el *Anexo D*. Las coordenadas obtenidas permitieron describir cuantitativamente las características cromáticas de las biopelículas elaboradas, donde L^* representa la luminosidad, a^* la variación entre tonalidades verdes y rojas, y b^* la variación entre tonalidades azules y amarillas.

5. Resultados

5.1 Análisis comparativo y selección del método de extracción

Se llevó a cabo un análisis comparativo de los métodos de extracción de almidón por vía húmeda y seca, a partir de la información recopilada en la revisión bibliográfica. La comparación se realizó considerando como criterios principales el rendimiento de almidón, la pureza del producto obtenido y la facilidad operativa, debido a su influencia directa en la viabilidad del proceso y en la calidad del almidón destinado a la elaboración de biopelículas. A pesar de esto, el análisis no se limitó exclusivamente a estos parámetros, sino que incluyó otros aspectos relevantes reportados en la literatura, tales como el consumo de agua, el tiempo total de procesamiento, los requerimientos de equipo, el riesgo de pardeamiento oxidativo, la necesidad de aditivos químicos, la adecuación del almidón, entre otros.

El análisis comparativo elaborado a partir de la información recopilada en la literatura, presentado en el *Apéndice E*, evidenció que el método seco presenta valores de rendimiento más altos, reportados entre 20 % y 22.5 % en base seca y alrededor de 21.3 % en base húmeda, mientras que el método húmedo registra rendimientos típicos entre 7 % y 11 % (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023; Chapuel & Reyes, 2019), aunque en otros estudios se han reportado valores entre 12 % y 20 % (Mendoza Chipantasi, 2021; Chel-Guerrero, Barbosa-Martín, Martínez-Antonio, Gonzalez, & Betancur-Ancona, 2016). Estas diferencias se asocian a la menor cantidad de etapas de separación y a la ausencia de lavados sucesivos en la vía seca; sin embargo, este método conduce a un almidón con menor grado de pureza, debido a la presencia de fibra, proteínas y cenizas. En contraste, el

método húmedo, aunque reporta rendimientos más bajos y mayores tiempos de procesamiento, permite la obtención de un almidón de mayor pureza, debido a la incorporación de etapas de filtración, sedimentación y lavado, así como al uso de agentes antioxidantes que favorecen la reducción de compuestos fenólicos y contribuyen al control del pardeamiento durante el proceso (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) .

Desde el punto de vista operativo, el método seco se describe como un procedimiento más simple y de menor costo, al requerir menos operaciones unitarias y no emplear reactivos químicos; no obstante, la limitada calidad del almidón obtenido restringe su aplicación en procesos que demandan propiedades estructurales y mecánicas controladas. Por su parte, el método húmedo implica una mayor complejidad operativa y un consumo elevado de agua y energía, pero ofrece un mayor control sobre las características fisicoquímicas del almidón, aspecto determinante para la formación de biopelículas continuas y homogéneas (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023).

En conjunto, el análisis comparativo permitió evaluar las ventajas y limitaciones de ambas alternativas y proporcionó el sustento técnico para la selección del método de extracción empleado en esta investigación. Aunque el método de extracción por vía seca presenta un mayor rendimiento y una operación más sencilla, se seleccionó la vía húmeda debido a que permite obtener un almidón de mayor pureza. Estas características permiten obtener un material más homogéneo y con mejores condiciones para su posterior formulación y caracterización en forma de biopelícula.

5.2 Selección y caracterización de la materia prima

Para el desarrollo experimental del proyecto, se consideró la información reportada en la literatura respecto al contenido de almidón en la semilla de aguacate, el cual varía en función de la variedad, el estado de maduración del fruto y la técnica de cuantificación empleada, pudiendo alcanzar hasta un 74 % en base seca en determinadas variedades (de Dios-Avila, 2022). Los valores reportados en la literatura para las diferentes variedades evaluadas se presentan en el *Apéndice F*.

Con base en la información recopilada en la revisión bibliográfica, se seleccionó la variedad Lorena como materia prima del proyecto, dado que la literatura reporta contenidos de almidón que pueden representar hasta el 67.6 % del peso seco de la semilla, compuesto aproximadamente por 32.4 % de amilosa y 35.2 % de amilopectina (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023), lo que evidencia un contenido significativo del biopolímero y respalda su aprovechamiento en las etapas de extracción y elaboración de la biopelícula. Adicionalmente, se tuvo en cuenta que el contenido de almidón reportado en la literatura no representa la fracción recuperable durante la extracción, dado que las etapas de separación y purificación implican pérdidas de material, y que el nivel de almidón alcanza su máximo cuando el fruto ha completado su madurez fisiológica, es decir, cuando ha acumulado la mayor cantidad de reservas antes del inicio de la sobre-maduración (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023).

5.3 Contenido de humedad

Se obtuvo un contenido de humedad de 64.33 % en la torta de almidón recuperada tras las etapas de sedimentación, decantación y lavado, determinado mediante el método

gravimétrico de secado en estufa (ISO 1666:1996; procedimiento de cálculo en el *Apéndice G*), lo que indica una elevada cantidad de agua retenida. Este resultado era esperado debido a que el almidón fue obtenido mediante extracción por vía húmeda, proceso que favorece la retención de agua entre los gránulos y en los espacios intergranulares de la torta húmeda (Piyachomkwan & Sriroth, 2017).

El elevado contenido de humedad evidencia la necesidad de la etapa de secado para reducir el agua retenida y garantizar la estabilidad del material antes de su caracterización y utilización en la elaboración de las biopelículas.

5.4 Rendimiento de extracción

Como resultado del proceso de extracción, se obtuvo un rendimiento de 2,22 % en base húmeda, calculado a partir de la relación entre la masa de almidón seco obtenido después del proceso de secado y la masa de semilla empleada en el proceso de extracción (véase *Apéndice H*), el cual representa la cantidad de almidón recuperada bajo las condiciones experimentales establecida.

Al comparar con los rendimientos reportados en la literatura, el valor obtenido en esta investigación se encuentra por debajo de los registrados para la extracción por vía húmeda. Rengifo Reyes y Téllez Espinosa (2023) reportaron valores entre 6,34 % y 10,4 %, mientras que Mendoza Chipantasi (2021) obtuvo rendimientos entre 12 % y 14,57 % bajo diferentes condiciones de operación. De manera similar, Chapuel y Reyes (2019), Silva (2014) y Guerrero Ch (2016) registraron valores de 7,64 %, 11,36 % y 19,99 %, respectivamente. Esta diferencia puede asociarse a las características de la materia prima,

las condiciones de operación y las pérdidas de material que pueden ocurrir durante las etapas de filtrado, sedimentación y lavados sucesivos para la purificación del almidón.

5.5 Identificación cualitativa del almidón

Como se observa en la *figura 2*, la muestra analizada presentó una coloración azul oscuro a negro tras la adición de la solución de Lugol, indicando un resultado positivo para la presencia de almidón. Este cambio de color confirma la presencia de este polisacárido en el material obtenido después del proceso de extracción, evidenciando la efectividad del método de extracción por vía húmeda empleado.

Figura 2.

Resultado de la identificación cualitativa del almidón mediante la prueba de Lugol.



5.6 Espesor

El espesor de las biopelículas se determinó mediante mediciones en trece puntos distribuidos sobre cada muestra, con el propósito de evaluar la uniformidad del material obtenido. Los valores promedio fueron de 0.1735 mm para el grupo G.1, correspondiente a la formulación con 10 g de glicerina, y de 0.2304 mm para el grupo G.2, que contenía 20 g de glicerina, evidenciando que esta última formulación presentó un mayor espesor promedio.

La diferencia observada entre ambos grupos puede atribuirse a variaciones en la formulación y al efecto de la concentración de glicerina sobre la estructura de las biopelículas, dado que durante el proceso de elaboración se mantuvo constante el volumen de solución filmogénica vertido en cada molde (Tarique, Sapuan, & Khalina, 2021). Un mayor espesor puede influir directamente sobre propiedades como la resistencia mecánica, la rigidez, la permeabilidad y la opacidad de las biopelículas. En este sentido, el espesor constituye un parámetro de referencia para interpretar los ensayos posteriores.

5.7 Densidad

Tras la evaluación de esta propiedad (*Apéndice I*), se obtuvieron valores promedio de 2.5521 g/cm³ para el grupo G.1 y de 2.6427 g/cm³ para el grupo G.2, evidenciando un incremento de la densidad en este último grupo.

El incremento registrado de la densidad en el grupo G.2 no debe interpretarse como una ausencia de efecto de la glicerina sobre la estructura de la biopelícula, sin embargo, este comportamiento podría atribuirse a una menor presencia de microvacíos internos y a un mayor grado de compactación aparente del material durante el secado, factores que favorecieron un ligero aumento de la densidad aparente (Prakash Maran, Sivakumar, Thirugnanasambandham, & Sridhar, 2013).

5.8 Hinchamiento

El grado de hinchamiento, determinado mediante el método gravimétrico por inmersión (para el desarrollo del cálculo, consultar el *Apéndice J*) indica la capacidad de la biopelícula para absorber agua, lo cual está relacionado con su naturaleza hidrofílica y con la presencia de grupos hidroxilo en las cadenas de almidón (Vamadevan & Bertoft,

2020). Los resultados obtenidos mostraron grados de hinchamiento de 1551.78 % para el grupo G.1 y de 1660.97 % para el grupo G.2, evidenciando que el incremento en la concentración del plastificante favoreció una mayor absorción de agua por parte de las biopelículas.

Este comportamiento puede atribuirse al carácter higroscópico de la glicerina, la cual aumenta la movilidad de las cadenas poliméricas y facilita la difusión del agua hacia el interior de la matriz (Prakash Maran, Sivakumar, Thirugnanasambandham, & Sridhar, 2013). Los valores obtenidos son muy altos frente al rango típico reportado en la literatura para biopelículas convencionales de almidón (20 %–200 %) (Jia, y otros, 2023), lo que sugiere un comportamiento análogo al de un hidrogel. Aun así, la tendencia de mayor hinchamiento a mayor concentración de glicerina es consistente con la bibliografía (Tarique, Sapuan, & Khalina, 2021), confirmando el efecto plastificante de este componente sobre la red polimérica.

5.9 Pérdida de masa soluble

Este parámetro cuantifica la fracción de material que se disuelve al contacto con agua, siendo un indicador de la estabilidad estructural de la biopelícula en medio acuoso (Gontard, Guilbert, & Cuq, 1992). Los resultados indicaron valores de 38.75 % para el grupo G.1 y de 47.83 % para el grupo G.2, evidenciando una mayor solubilización en las biopelículas con mayor contenido de glicerina (*Apéndice K*).

Este resultado sugiere que un mayor contenido de glicerina reduce la cohesión de la matriz polimérica, permitiendo que una mayor proporción del material se libere hacia el medio acuoso durante el ensayo (Ghanbarzadeh, Almasi, & Entezami, 2010; Spada, da

Silva, & Tessaro, 2014). Este comportamiento es coherente con los valores de hinchamiento obtenidos, confirmando que el grupo G.2 experimenta una mayor pérdida de integridad estructural ante el entorno acuoso.

5.10 Propiedades ópticas

Los valores de absorbancia obtenidos a 600 nm fueron de 0.66 para G.1 y de 0.76 para G.2, con transmitancias promedio de 21.8 % y 17.41 % respectivamente, lo que indica que ambas formulaciones retienen más del 75 % de la luz incidente (obtención de los valores en el *Apéndice L*). Esta característica representa una propiedad de barrera lumínica favorable para aplicaciones en empaque de alimentos, ya que la baja transmitancia limita el paso de luz visible, reduciendo el riesgo de fotooxidación lipídica, degradación de pigmentos y pérdida de vitaminas en el producto envasado (Ezati, y otros, 2023). En este sentido, G.2 ofrece una mayor protección lumínica real al dejar pasar menos luz que G.1. Sin embargo, al calcular el índice de opacidad mediante la relación entre la absorbancia y el espesor, G.2 obtuvo un valor menor frente a G.1, lo cual es un efecto matemático derivado de su mayor espesor al dividir y no indica que el material sea más translúcido (Prakash Maran, Sivakumar, Thirugnanasambandham, & Sridhar, 2013).

Los parámetros colorimétricos obtenidos se resumen en la Tabla 1 (desarrollo matemático en el *Apéndice M*). Para el cálculo de los valores tristímulo se emplearon el iluminante D65, que representa la luz natural del día, y el observador estándar de 1931, modelo de visión humana promedio establecido por la CIE, con intervalos de 10 nm. Estas condiciones constituyen el estándar internacional para la caracterización óptica de

películas, garantizando la comparabilidad de los resultados (Spada, da Silva, & Tessaro, 2014).

En términos generales, G.1 es más claro, menos amarillo y más blanco que G.2, diferencias que pueden atribuirse al efecto de la mayor concentración de glicerina sobre la coloración de la matriz durante el secado (Sanyang, Sapuan, Jawaaid, Ishak, & Sahari, 2015). La diferencia total de color $\Delta E^* = 5.28$ supera el umbral de percepción visual (Galić, Ščetar, Kurek, Čaval, & Vidović, 2019), confirmando que ambas formulaciones son cromáticamente distinguibles a simple vista.

Tabla 1.

Parámetros ópticos y colorimétricos de las biopelículas formuladas.

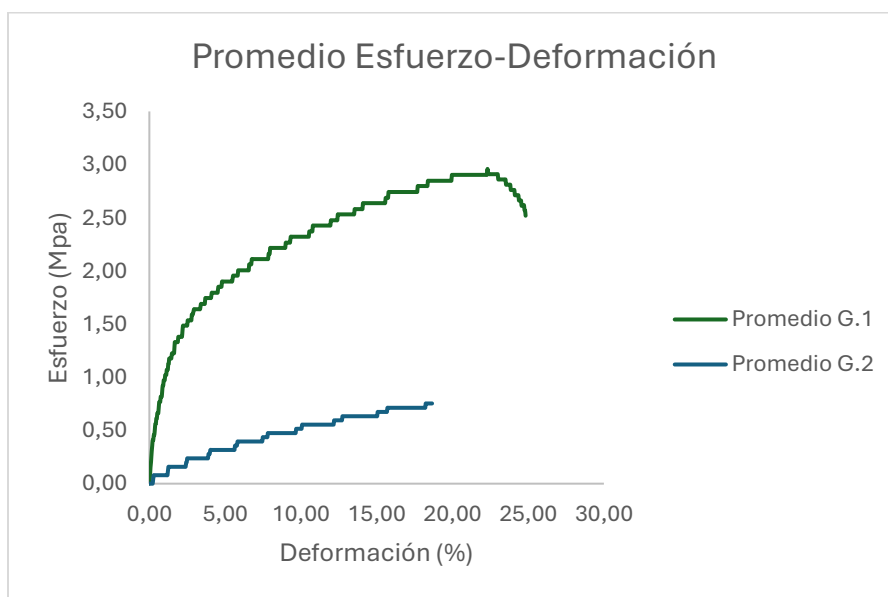
Parámetro	G.1	G.2
<i>Absorbancia (600 nm)</i>	0.66	0.76
<i>Transmitancia (%)</i>	21.8	17.41
<i>Opacidad (A/mm)</i>	4.50	3.74
<i>Luminosidad (L*)</i>	53.83	48.81
<i>Coordenada cromática (a*)</i>	0.79	1.06
<i>Coordenada cromática (b*)</i>	7.19	8.80
<i>Índice de Amarillez (YI)</i>	26.45	32.57
<i>Índice de blancura (WI)</i>	53.27	48.63
<i>Diferencia total de color ΔE^*</i>	5.28	

5.11 Propiedades mecánicas

La caracterización mecánica de las biopelículas permitió evaluar el efecto de la concentración de glicerina sobre su comportamiento a tracción (datos experimentales: *Apéndice N*). Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas durante el ensayo (curvas individuales: *Apéndice O*), presentadas en la *figura 3*, muestran la respuesta mecánica de las formulaciones G.1 y G.2. A partir de ellas se determinaron la resistencia a la tracción, la elongación a la rotura y el módulo de Young.

Figura 3.

Curvas esfuerzo-deformación obtenidas durante el ensayo de tracción de las biopelículas G.1 y G.2.



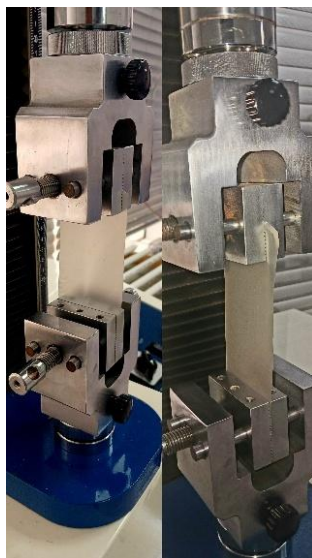
A partir de estas curvas, se determinó que la resistencia a la tracción de G.1 fue de 3,21 MPa, considerablemente superior a la de G.2 con 0,97 MPa (cálculos: *Apéndice P*), lo que indica que las biopelículas con menor contenido de glicerina presentan una mayor

resistencia mecánica. Durante la realización del ensayo, ambas formulaciones fueron sometidas a carga uniaxial, como se observa en la *figura 4*, una vez finalizada la prueba, las probetas presentaron la fractura correspondiente al esfuerzo aplicado, tal como se muestra en la *figura 5*. Este comportamiento es coherente con el efecto plastificante de la glicerina: a mayor concentración, mayor movilidad de las cadenas poliméricas y menor cohesión estructural (Prakash Maran, Sivakumar, Thirugnanasambandham, & Sridhar, 2013).

Rengifo Reyes y Téllez Espinosa (2023) reportaron resistencias de hasta 8.55 MPa en biopelículas de almidón de semilla de aguacate variedad Lorena, valores superiores a los obtenidos en este trabajo. De manera similar, Lubis et al. (2018) reportaron una resistencia de 2.74 MPa para una formulación de almidón de semilla de aguacate reforzada con celulosa microcristalina, mientras que Montañez Cervantes (2022) obtuvo valores de 0.68 MPa en un bioplástico no reforzado y de 0.87 MPa en un material reforzado con harina de semilla de aguacate. En este contexto, G.1 presentó una resistencia superior a los valores obtenidos por Montañez Cervantes (2022) y cercana a la reportada por Lubis et al. (2018), aunque inferior a la alcanzada por Rengifo Reyes y Téllez Espinosa (2023). Esta diferencia puede atribuirse a las distintas formulaciones empleadas, ya que la incorporación de componentes adicionales como el CMC pudo generar interacciones distintas entre los componentes de la matriz y afectar su resistencia final.

Figura 4.

Montaje de las biopelículas durante el ensayo de tracción.



Nota: A la izquierda se presenta la biopelícula correspondiente al grupo G.1 y a la derecha la correspondiente al grupo G.2

El porcentaje de elongación a la rotura fue de 31.12 % para G.1 y de 35.20 % para G.2, evidenciando que el aumento en la concentración de glicerina favoreció una mayor flexibilidad del material. En biopelículas elaboradas a base de almidón plastificado con glicerina, esta tendencia es esperada, ya que el plastificante reduce la rigidez de la red polimérica al incrementar la movilidad de las cadenas (Vieira, da Silva, dos Santos, & Beppu, 2011). Sin embargo, el incremento observado entre ambos grupos es moderado considerando que la cantidad de glicerina se duplicó. Esto puede explicarse porque durante el secado la red polimérica alcanza una capacidad máxima de retención de glicerina mediante enlaces de hidrógeno; cuando esta capacidad se supera, el exceso de plastificante migra hacia la superficie de la película sin contribuir a su flexibilización.

Los valores de elongación obtenidos muestran un comportamiento comparable con los reportados por otros autores. Rengifo Reyes y Téllez Espinosa (2023) registraron valores de hasta 190,57 %, asociados a las diferentes formulaciones evaluadas, mientras que Lubis et al. (2018) obtuvieron 3,16 % en una formulación reforzada con celulosa microcristalina. Por su parte, Montañez Cervantes (2022) reportó una elongación de 15,79 % para un bioplástico reforzado con harina de semilla de aguacate.

Figura 5.

Biopelículas después del ensayo de tracción.



Nota: A la izquierda se presenta la biopelícula correspondiente al grupo G.1 y a la derecha la correspondiente al grupo G.2, una vez producida la fractura.

Finalmente, el módulo de Young fue de 170.75 MPa para G.1 y de 17.54 MPa para G.2, evidenciando que G.1 es considerablemente más rígido, mientras que G.2 presenta un comportamiento más elástico y deformable. En conjunto, estos resultados confirman que el nivel de glicerina tiene un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas de las biopelículas, tal como se cuantifica en el modelo matemático del diseño factorial 2^1 presentado en el *Apéndice Q*.

La respuesta mecánica obtenida permite diferenciar el posible campo de aplicación de ambas formulaciones. La mayor resistencia a la tracción y rigidez de G.1 favorecen su empleo potencial en empaques secos de corta vida útil o como láminas separadoras, donde se requiere conservar la integridad dimensional del material durante su manipulación. Por su parte, la menor resistencia y el menor módulo de Young de G.2, acompañados de una mayor elongación, indican un material más flexible y deformable, con potencial para aplicaciones donde predomine la capacidad de adaptación a superficies y no la resistencia a cargas elevadas. Estas posibilidades deben considerarse como una orientación preliminar, ya que la selección de una aplicación específica requiere complementar la caracterización mecánica con propiedades de barrera, estabilidad frente a la humedad y comportamiento durante el uso.

6. Conclusiones

El proceso de extracción por método húmedo resultó el más adecuado para la producción de una biopelícula continua y homogénea, a pesar de tener menor rendimiento frente al método seco. Dicho método permitió obtener almidón a partir de semilla de aguacate, con un rendimiento del 2.22% y un contenido de humedad de 64.33 % en la torta húmeda, confirmando la presencia del polisacárido mediante la prueba de Lugol. Indicando que las pérdidas asociadas a las etapas de filtración, sedimentación, lavado y tamizado constituyen los principales factores que limitan el rendimiento de extracción bajo las condiciones operativas empleadas.

La caracterización de las biopelículas evidenció que la concentración de glicerina como plastificante afecta de manera significativa las propiedades mecánicas, físicas y ópticas del material obtenido. Un mayor contenido de glicerina reduce la resistencia a la tracción y el módulo de Young, incrementa la elongación a la rotura, el grado de hinchamiento y la pérdida de masa soluble, generando películas de mayor espesor con coloraciones más oscuras.

Las propiedades de la biopelícula obtenida están determinadas principalmente por la concentración del plastificante empleado: a mayor contenido de glicerina, menor resistencia mecánica y mayor flexibilidad e hidrofilia del material. Los valores de resistencia a la tracción obtenidos por las pruebas realizadas (3.21 MPa para G.1 y 0.97 MPa para G.2) son inferiores a los reportados en antecedentes para la misma variedad (8.55 MPa de Tellez), diferencia atribuible a la incorporación de CMC en la formulación. Con base a estos resultados, G.1 presenta condiciones mecánicas con potencial de aplicación

como material de empaque primario para productos secos como granos o productos deshidratados que no requieran resistir cargas de compresión ni contacto con humedad durante su almacenamiento.

7. Recomendaciones

Se sugiere optimizar las etapas de filtración y sedimentación de método húmedo, esto con el fin de incrementar el rendimiento en la extracción del almidón. Por otra parte, se recomienda desarrollar modificaciones químicas de la matriz del almidón, que permitan reducir la hidrofilia del material para poder ampliar el rango de aplicación en ambientes con mayor humedad. Finalmente, se propone evaluar el efecto de diferentes proporciones respecto al CMC y glicerina sobre las propiedades de la biopelícula.

Referencias bibliográficas.

- Alemu, N., Balakrishnan, S., & Debtera, B. (2022). Extraction and Characterisation of Avocado Seed Starch, and Its Blend with Enset Cellulosic. *Advances in Materials Science and Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1155/2022/9908295>
- Armijos Quezada, A. B. (2021). *Obtención de bioplástico a partir del almidón de semillas de yaca (Artocarpus heterophyllus) y aguacate hass (Persea americana) para su uso en el recubrimiento de alimentos*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7a. ed. ed.). Ciudad de Mexico: Cengage Learning.
- ASTM D882: *Método de ensayo estándar de las propiedades de tracción de láminas delgadas de plástico*. (s.f.). (Shandong Paratronix Industrial Technology Co., Ltd) Obtenido de https://es.paratronixen.com/news/News/ASTM-D882--Standard-Test-Method-for-Tensile-Properties-of-Thin-Plastic-Sheeting_360545.html
- ASTM International. (2023). *Standard Practice for Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation*. ASTM International.
- ASTM International. (2024). *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. ASTM International.
- ASTM International. (2018). *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. ASTM International. Obtenido de <https://compass.astm.org/content-access?contentCode=ASTM%7CD0638-22%7Cen-US>

ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Transparency of Plastic Sheeting*. ASTM International.

ASTM International. (2020). *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. ASTM International. Obtenido de <https://compass.astm.org/content-access?contentCode=ASTM%7CD0792-20%7Cen-US>

ASTM International. (2021). *Standard Guide for Determination of Thickness of Plastic Film Test Specimens*. ASTM International.

ASTM International. (2022). *Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System*. ASTM International.

ASTM International. (2022). *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. ASTM International.

Cáceres, V. I., Chaparro, A., & Sánchez Molina, J. (2021). *Caracterización de materiales arcillosos y su potencial aplicación en la industria cerámica*. Cúcuta, Colombia: Universidad de Pamplona.

Chapuel, A., & Reyes, J. (2019). *Obtención de una película biodegradable a partir de los almidones de semilla de aguacate (Persea americana Mill) y banano (Musa acuminata AAA) para el recubrimiento de papaya*. Universidad de Guayaquil. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/436863076/Antecedente-Obtenc-Pelicula-Biodegradable-Partir-Almidones-Semilla-de-Aguacate>

- Chel-Guerrero, L., Barbosa-Martín, E., Martínez-Antonio, A., González, E., & Betancur-Ancona, D. (2016). Some physicochemical and rheological properties of starch isolated from avocado seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 86, 302-308.
- CIRUMEDICS S.A.S. (2025). Obtenido de Cirumedics - Fabricantes de Colorantes y Medios de Cultivo para laboratorio: <https://www.cirumedics.com/>
- Contaminación por plásticos*. (s.f.). (UNEP - UN Environment Programme) Obtenido de <https://www.unep.org/es/contaminacion-por-plasticos>
- de Dios-Avila, N. T.-G.-V.-V.-E.-F.-A. (2022). *Caracterización estructural y fisicoquímica de almidones de semilla de aguacate modificados mediante hidrólisis ácida a alta temperatura*. Revista Bio Ciencia.
- Dewi, R., Sylvia, N., Zulnazri, Z., Fithra, H., Riza, M., Siregar, J. P., . . . Anis, S. (2024). *The Optimization of Avocado-Seed-Starch-Based Degradable Plastic Synthesis with a Polylactic Acid (PLA) Blend Using Response Surface Methodology (RSM)*.
- Ezati, P., Khan, A., Priyadarshi, R., Bhattacharya, T., Tammina, S. K., & Rhim, J.-W. (2023). Biopolymer-based UV protection functional films for food packaging. *Food Hydrocolloids*, 142.
- Galić, K., Ščetar, M., Kurek, M., Čaval, M., & Vidović, N. (2019). Comparison of Two pH Responsive Color Changing Bio-Based Films Containing Wasted Fruit Pomace as a Source of Colorants. *Journal of Food Science*, 84(9).

- Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., & Entezami, A. A. (2010). Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 697-702.
- Global Growth Insights. (2025). Obtenido de <https://www.globalgrowthinsights.com/es/market-reports/bioplastics-and-biopolymers-market-105425>
- Gontard, N., Guilbert, S., & Cuq, J.-L. (1992). Edible Wheat Gluten Films: Influence of the Main Process Variables on Film Properties using Response Surface Methodology. *Journal of Food Science*, 57(1), 190–195.
- Higuera Sarmiento, C. A., Rodriguez Figueroa, N., & Zuluaga Orjuela, K. J. (2021). *Bioplásticos a partir de la semilla de aguacate*. Trabajo de grado - Facultad de Ingeniería, Universidad EAN, Bogotá.
- Insights, G. G. (2026). *Global Growth Insights*. Obtenido de Global Growth Insights: Global Growth Insights. (2026). Retrieved from <https://www.globalgrowthinsights.com/es/market-reports/bioplastics-and-biopolymers-market-105425>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificació. (1996). *Ingeniería civil y arquitectura. Masa unitaria de concreto liviano estructural*. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003). *Frutas frescas. Aguacate. Variedades mejoradas. Especificaciones*. ICONTEC. Obtenido de <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=106597>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2014). *Productos de molinería. Almidón nativo de yuca*. ICONTEC. Obtenido de <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=5422>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *lásticos. Método de ensayo para determinar las propiedades de tracción de láminas plásticas delgadas*. ICONTEC.

ISO 3593:1981; *Almidón — Determinación de cenizas*. (s.f.). (Colección Electrónica ICONTEC) Obtenido de <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=14329>

Jia, R., Cui, C., Gao, L., Qin, Y., Ji, N., Dai, L., . . . Sun, Q. (2023). A review of starch swelling behavior: Its mechanism, determination methods, influencing factors, and influence on food quality. *Carbohydrate Polymers*, 321.

Jiménez, R., Sandoval-Flores, G., Alvarado-Reyna, S., Alemán-Castillo, S. E., Santiago-Adame, R., & Velázquez, G. (2022). Extraction of starch from Hass avocado seeds for the preparation of biofilms. *Food Science and Technology*, 42. Obtenido de <https://doi.org/10.1590/fst.56820>

Jiménez, R., Zambrano, J., & Maza, F. (2021). Extraction of starch from Hass avocado seeds for the preparation of biofilms. *Food Science and Technology*, 41. Obtenido de <https://doi.org/10.1590/fst.56820>

Mendoza Chipantasi, M. L. (2021). *Elaboración de biopelícula biodegradable a partir del desecho industrial de la semilla de aguacate (Persea americana), para sustituir alternativamente*

- materiales obtenidos de polímeros sintéticos*. Trabajo de titulación - Proyecto de Investigación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Merino, D., Bertolacci, L., Simonutti, R., Paul, U. C., Simonutti, R., & Athanassiou, A. (2021). *Avocado Peels and Seeds: Processing Strategies for the Development of Highly Antioxidant Bioplastic Films*.
- Mongui Torres, L. M., & Quintero Calderón, S. S. (2021). *Generación de bioplástico a base del almidón producido por la semilla del aguacate*.
- Montañez Cervantes, M. A. (2022). *Producción de bioplástico a partir de almidón de semilla de aguacate (Persea spp.) reforzado con material lignocelulósico*. México.
- Muñoz-Gimena, P. F., Oliver-Cuenca, V., Peponi, L., & López, D. (2024). Development of Biodegradable Films Based on Starch and Active Compounds. *Polymers*, 16(20), 2868. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/polym16202868>
- Nguyen, C. T., Duy, N. B., & Xuyen, H. T. (2024). Blends Based on Biodegradable Polymers and Starch: A Review. *Polymer Science, Series A*, 66(1), 125-140. Obtenido de <https://doi.org/10.1134/S0965545X23600485>
- Ochoa Betancur, M., Aguirre Arroyave, M. C., Ochoa Mondragón, M. F., & Serna Jiménez, J. A. (2024). *Estudio de mercado y vigilancia tecnológica del aguacate hass y sus derivados*.
- Organización Internacional de Normalización. (1993). *Plastics — Film and sheeting — Determination of thickness by mechanical scanning*. ISO.

Organización Internacional de Normalización. (1996). *Starch — Determination of moisture content — Oven-drying method*. ISO. Obtenido de <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=10784>

Organización Internacional de Normalización. (2008). *Plastics — Determination of water absorption*. ISO.

Organización Internacional de Normalización. (2018). *Plastics — Determination of tensile properties — Part 3: Test conditions for films and sheets*. ISO. ISO. Obtenido de <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=75307>

Pérez Delgado, C. A., & Hoyos Conde, K. D. (2025). *Cubertería biodegradable con semilla de aguacate*.

Pérez, D. (2024). *El Frente*. (Aguacate Hass es un impulso al desarrollo agrícola en Santander) Obtenido de <https://elfrente.com.co/aguacate-hass-es-un-impulso-al-desarrollo-agricola-en-santander/>

Perwitasari, D. S., Fauziyah, N. A., Pesra, R. H., & Putu, N. L. (2024). *Preliminary Study of Synthesis and Characterization of Biodegradable Avocado Seed Starch-Chitosan Plastic with Glycerol Plasticizer*.

Piyachomkwan, K., & Sriroth, K. (2017). Effect of processing on cassava starch quality: 1. drying. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 67(2), 125-133.

Plásticos. método de ensayo para determinar las propiedades de tracción de láminas plásticas delgadas. (s.f.). (ICONTEC e-Collection) Obtenido de <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=79722>

- Prakash Maran, J., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., & Sridhar, R. (2013). Degradation behavior and inherent properties of starch-based biofilms. *Food Hydrocolloids*, 31(2), 248-255.
- Quispe-Sánchez, L., Mena-Chacón, L. M., Oblitas-Delgado, R., Meléndez-Mori, J. B., & Oliva-Cruz, M. (2026). Biodegradable films based on avocado seed starch and essential oils from mandarin peel (*Citrus unshiu* Marcow. cv. Miyagawa Wase) and rosemary (*Rosmarinus officinalis*). *Applied Food Research*.
- Rengifo Reyes, D. A., & Téllez Espinosa, E. P. (2023). *Elaboración de biopelícula a partir de la semilla de aguacate variedad Lorena*. Proyecto integral de grado - Programa de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.
- Santiago-Adame, R., & Velázquez, G. (2022). Extraction of starch from Hass avocado seeds for the preparation of biofilms. *Food Science and Technology*, 42. Obtenido de <https://doi.org/10.1590/fst.56820>
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2015). Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch for food packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 326–336.
- Sartika, M., Lubis, M., Harahap, M. B., Afrida, E., & Ginting, M. H. (2018). Production of bioplastic from avocado seed starch reinforced with microcrystalline cellulose from sugar palm fibers. *Asian Journal of Chemistry*, 30(3), 520. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/323276614_Production_of_bioplastic_from_avocado_seed_starch_reinforced_with_microcrystalline_cellulose_from_sugar_palm_fibers

sas, S. (s.f.). *Suquin S.A.S.- Materias primas para la industria y más*. Obtenido de <https://suquin.com.co/>

Spada, J. C., da Silva, E. M., & Tessaro, I. C. (2014). Production and characterization of pinhão starch biofilms. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(3), 365–369.

Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11(1).

Tesfaye, T., Gibril, M., Sithole, B., Ramjugernath, D., Chavan, R., Chunilall, V., & Gounden, N. (2018). Valorisation of avocado seeds: Extraction and characterization of starch for textile applications. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 2154.

United Nations. (s.f.). *Día Mundial del Medio Ambiente | United Nations*. (United Nations) Obtenido de <https://www.un.org/id/node/71040>

Valero-Valdivieso, M. F., Ortegon, Y., & Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: avances y perspectivas. *DYNA*, 80(181), 171-180.

Vamadevan, V., & Bertoft, E. (2020). Observations on the impact of amylopectin and amylose structure on the swelling of starch granules. *Food Hydrocolloids*, 103.

Vieira, M. G., da Silva, M. A., dos Santos, L. O., & Beppu, M. M. (2011). Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *European Polymer Journal*, 47(2), 254-263.

Wang, J., Li, Y., Jin, Z., & Cheng, Y. (2022). Physicochemical, Morphological, and Functional Properties of Starches Isolated from Avocado Seeds, a Potential Source for Resistant Starch. *Biomolecules*, 12(8), 1121. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/biom12081121>

Yusmaniar, Y., Syafei, D. I., Arum, M., Handoko, E., Kurniawan, C., & Asali, M. R. (2019).

Preparation and characterization of Seaweed based Bioplastic Blended with Polysaccharides derived from various seeds of Avocado, Jackfruit and Durian.

ZwickRoell, Z. (s.f.). *ISO 527-3 | Ensayo de tracción en láminas y films plásticos.* (ISO 527-3 |

Ensayo de tracción en láminas y films plásticos) Obtenido de

<https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/hojas-y-laminas-plasticas/propiedades-de-traccion-iso-527-3/>

Apéndices

Apéndice A. *Procedimiento para la verificación cualitativa de almidón mediante la prueba de Lugol.*

El análisis cualitativo para confirmar la presencia y pureza preliminar del polímero amiláceo extraído a partir de la semilla de aguacate se fundamentó en la interacción química entre los átomos de yodo y las cadenas lineales de amilosa. Para la ejecución del ensayo, se tomaron 3 g de la muestra de almidón deshidratado y pulverizado, los cuales se disolvieron completamente en 10 mL de agua destilada previamente calentada para favorecer la dispersión de los gránulos.

Una vez homogeneizada la solución, el sistema se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Posteriormente, se adicionaron de forma directa cuatro gotas del reactivo comercial de Lugol (solución de yodo y yoduro de potasio). La reacción positiva se determinó mediante la aparición inmediata de una coloración azul oscuro o negra intensa, la cual es característica del complejo de inclusión formado por la retención del yodo dentro de la estructura helicoidal de la amilosa.

Apéndice B. *Expresiones matemáticas para la caracterización mecánica de biopelícula.*

Área Transversal

El cálculo del área transversal (A_0) de cada muestra de biopelícula se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$A_0 = w \cdot t \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde w corresponde al ancho de la probeta y t al espesor promedio de la muestra

Resistencia a la tracción

La resistencia máxima a la tracción (σ_{max}) se determinó a partir de la fuerza límite alcanzada antes de la falla física, utilizando la expresión:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde F_{max} es la fuerza máxima registrada durante el ensayo.

Elongación a la rotura

La capacidad de deformación longitudinal de las muestras en el punto de fractura se calculó porcentualmente mediante la relación:

$$\varepsilon_b(\%) = \left(\frac{L_b - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde ε_b es la elongación a la rotura expresada en porcentaje, L_b corresponde a la longitud de la probeta al momento de la fractura y L_0 a la longitud inicial.

Módulo de Young

La rigidez elástica del material se obtuvo evaluando la pendiente de la región lineal dentro de la curva esfuerzo-deformación, conforme a la fórmula:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde E es el módulo de Young, $\Delta\sigma$ corresponde a la variación del esfuerzo en la zona lineal y $\Delta\varepsilon$ es la variación de la deformación nominal unitaria en la zona lineal.

Apéndice C. Ecuaciones matemáticas para la caracterización física de biopelículas

Gravedad específica y Densidad

La gravedad específica se determinó a partir de las variaciones de masa por desplazamiento de líquido empleando la siguiente expresión:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{a}{a-b} \quad (\text{Ec. 7})$$

Con base en dicho valor, la densidad absoluta (ρ) de la biopelícula se calculó mediante:

$$\rho = \left(\frac{a}{a-b} \right) \cdot \rho_{\text{agua}} \quad (\text{Ec. 8})$$

En estas expresiones, la variable a representa la masa de la muestra de biopelícula registrada en aire expresada en gramos, mientras que b corresponde a la masa de la muestra de biopelícula registrada al encontrarse sumergida en agua destilada, calculada también en gramos. Por su parte, el término ρ_{agua} denota la densidad del agua destilada a la temperatura del ensayo, fijada para este estudio en 0.99756 g/cm^3 .

Porcentaje de hinchamiento real

La capacidad de absorción y expansión volumétrica de la matriz polimérica en estado de equilibrio se calculó porcentualmente mediante la relación:

$$GH(\%) = \left[\frac{(M_2 - M_3)}{M_3} \right] \times 100 \quad (\text{Ec. 9})$$

Para esta ecuación, el término $GH(\%)$ expresa el porcentaje de hinchamiento real de la muestra analizada. La variable M_2 representa la masa húmeda de la muestra pesada en gramos inmediatamente después de cumplir el periodo de inmersión establecido, en

tanto que M_3 define la masa seca final de la muestra, medida en gramos, obtenida luego de someter el material al proceso posterior de deshidratación.

Pérdida de masa soluble

La fracción de componentes hidrofílicos que migraron o se disolvieron en el medio acuoso se cuantificó porcentualmente mediante la ecuación:

$$PMS(\%) = \left[\frac{(M_1 - M_3)}{M_1} \right] \times 100 \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde la variable PMS (%) indica el porcentaje de pérdida de masa soluble de la muestra de biopelícula. Dentro del modelo, el parámetro M_1 corresponde a la masa seca inicial de la muestra en gramos registrada antes de iniciar el ensayo de inmersión, mientras que M_3 equivale a la masa seca final de la muestra en gramos obtenida al concluir el secado posterior.

Apéndice D. Expresiones matemáticas para la caracterización óptica de biopelículas.

Opacidad

La opacidad de las matrices poliméricas se determinó relacionando la absorción de luz a una longitud de onda fija con el espesor de la muestra mediante la ecuación:

$$Opacidad = \frac{A_{600}}{D} \quad (\text{Ec. 11})$$

En este modelo, el parámetro A_{600} representa la absorbancia adimensional medida de forma experimental a una longitud de onda de 600 nm, mientras que la variable D corresponde al espesor medido de la biopelícula expresado en milímetros.

Transmitancia y Luz retenida.

La transformación de los valores experimentales de absorbancia a porcentajes de transmitancia espectral para cada longitud de onda (λ) se realizó a través de la expresión:

$$\% T_{\lambda} = 10^{-A_{\lambda}} \times 100 \quad (\text{Ec. 12})$$

A partir de este resultado, el porcentaje de luz retenida o bloqueada por la matriz polimérica se determinó cuantitativamente mediante la relación:

$$\%LR = 100 - \%T \quad (\text{Ec. 13})$$

Para este conjunto de ecuaciones, $\% T_{\lambda}$ denota el porcentaje de transmitancia calculado a una longitud de onda específica, mientras que A_{λ} define la absorbancia medida a esa misma longitud de onda. Asimismo, $\%LR$ representa el porcentaje de luz retenida o bloqueada por la biopelícula y $\%T$ equivale al porcentaje de transmitancia general determinado experimentalmente para la muestra.

Coordenadas tristímulo CIE (X, Y, Z)

El cálculo de los componentes tristímulo se llevó a cabo aplicando el método de coeficientes ponderados en la región del espectro visible mediante las fórmulas:

$$X = \sum_{360}^{780} (\%T_{\lambda} \cdot W_{x,\lambda}) \quad (\text{Ec.14})$$

$$Y = \sum_{360}^{780} (\%T_{\lambda} \cdot W_{y,\lambda}) \quad (\text{Ec. 15})$$

$$Z = \sum_{360}^{780} (\%T_{\lambda} \cdot W_{z,\lambda}) \quad (\text{Ec. 16})$$

Dentro de estas expresiones sumatorias, las variables X , Y y Z representan las coordenadas tristímulo del sistema colorimétrico de la Comisión Internacional de la

Iluminación. Por su parte, los términos $W_{x,\lambda}$, $W_{y,\lambda}$ y $W_{z,\lambda}$ corresponden a los coeficientes de ponderación normalizados y establecidos por la norma técnica para cada longitud de onda evaluada.

Coordenadas colorimétricas CIE L^* , a^* y b^*

La conversión del espacio tristímulo a las coordenadas de color uniformes requirió el uso de una función de transformación condicional $f(t)$, expresada matemáticamente como:

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & \text{si } t > 0.008856 \\ 7.787037t + \frac{16}{116} & \text{si } t \leq 0.008856 \end{cases} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde la variable general t representa de forma respectiva la relación adimensional entre los parámetros obtenidos experimentalmente y los valores del blanco estándar de referencia para el iluminante seleccionado, calculada para cada componente mediante los modelos:

$$t_x = \frac{X}{95.047} * \frac{1}{100} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$t_y = \frac{Y}{100.00} * \frac{1}{100} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$t_z = \frac{Z}{108.883} * \frac{1}{100} \quad (\text{Ec. 20})$$

Finalmente, el cálculo de las coordenadas colorimétricas tridimensionales del sistema CIE L^* , a^* y b^* se efectuó a partir de las siguientes ecuaciones:

$$L^* = 116 \times f(t_y) - 16 \quad (\text{Ec. 21})$$

$$a^* = 500 [f(t_x) - f(t_y)] \quad (\text{Ec. 22})$$

$$b^* = 200 [f(t_y) - f(t_z)] \quad (\text{Ec. 23})$$

En estas fórmulas, L^* define la coordenada de luminosidad que varía en una escala de cero a cien. La variable a^* denota la variación cromática entre las tonalidades verdes y rojas, en tanto que b^* establece la variación de color comprendida entre las tonalidades azules y amarillas.

Índices de amarillez, blancura y diferencia total de color

La evaluación complementaria de los atributos ópticos y la variación cromática global de las biopelículas se realizó empleando las expresiones:

$$YI = \frac{100(1.2769X - 1.0592Z)}{Y} \quad (\text{Ec. 24})$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Ec. 26})$$

En este último grupo de ecuaciones, el término YI representa el índice de amarillez calculado para la muestra, mientras que WI corresponde al índice de blancura obtenido. Por último, la variable ΔE^* expresa la diferencia total de color, donde los parámetros, ΔL^* , Δa^* y Δb^* representan las desviaciones o diferencias aritméticas halladas entre las coordenadas colorimétricas de la biopelícula evaluada y las del material tomado como referencia estándar.

Apéndice E. *Comparación de los métodos de extracción de almidón empleada para la selección del método experimental.***Tabla 2.***Evaluación técnica de los métodos de extracción de almidón*

Ítem	Húmedo	Seco
Principio del método	Se basa en el uso de un medio líquido (agua o solución química de bisulfito de sodio) para separar y purificar los gránulos de almidón de otros componentes vegetales, como la fibra y las proteínas, aprovechando la diferencia de densidades entre estos materiales (Mendoza Chipantasi, 2021)	Se fundamenta en la eliminación controlada de la humedad de la semilla mediante tiempo y temperatura, seguida de procesos mecánicos de reducción de tamaño y clasificación, sin recurrir a separación en medio líquido. Privilegia la transformación directa de la semilla deshidratada en un polvo fino. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)
Uso de agua o solventes	Utiliza grandes volúmenes de agua en licuado, filtración y lavados, además de soluciones químicas como bisulfito de sodio (1 g/L – 0.2%), empleado como antioxidante para prevenir el pardeamiento y blanquear el almidón. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) (Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021)	El uso de agua es mínimo y no extractivo, limitado únicamente al lavado superficial inicial para eliminar restos de pulpa e impurezas. No se emplean solventes ni reactivos químicos, y el agua no participa como medio de separación del almidón (Mendoza Chipantasi, 2021) (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)
Etapas del proceso	• Lavado, secado inicial y descascarillado. • Corte y licuado con agua + bisulfito. • Filtrado y sedimentación (2 h). • Lavados y decantaciones sucesivas (≈3 ciclos).	• Recepción, limpieza y lavado superficial. • Acondicionamiento y descascarillado mediante secado inicial (≈5 días). • Corte de la semilla (≈1 cm). • Secado crítico en horno (65 °C, ≈41.45 h).

	• Secado prolongado (60–65 °C por ~41 h). • Molienda, tamizado y almacenamiento. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) (Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021)	• Molienda o pulverización. • Tamizado (45–100 µm). • Almacenamiento en desecador o envases herméticos. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) (Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021)
Porcentaje de humedad final	Presenta alta humedad residual, entre 75.15% y 85.62%, con un promedio de 80.51%, atribuida a los múltiples lavados y a la retención de agua en la pasta final. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)	Presenta una humedad final promedio de 64.64%, significativamente menor que la del método húmedo, debido a la ausencia de lavados y a la menor carga hídrica del material previo al secado. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)
Tiempo estimado del proceso	• Secado inicial: 5 días. • Sedimentación: 2 h (hasta 24 h en algunas metodologías). • Lavados repetidos: varias horas. • Secado final: ≈41 h. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) (Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021)	El tiempo total es de aproximadamente 7 días, distribuidos en: • 5 días de acondicionamiento y descascarillado. • ≈2 días de secado crítico en horno. Las etapas de molienda y tamizado son rápidas en comparación con la vía húmeda (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) (Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021)
Rendimiento de almidón	El rendimiento es bajo: • Rango típico: 7–11%. • Mejor valor experimental: 11.16% (BS).	El método seco presenta alto rendimiento, con valores reportados entre 20% y 22.5% en base seca, y alrededor de 21.3% en base húmeda, casi duplicando el rendimiento del método húmedo.

	En otros estudios: 12–16% cuando varían rpm y tiempo.	(Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)
Pureza del almidón obtenido	(Mendoza Chipantasi, 2021) - Cenizas muy bajas: 0.28–0.65%, menores que el método seco (2.45%). - Múltiples lavados + acción del bisulfito → almidón más blanco, fino y libre de proteínas/fibra.	La pureza es inferior, ya que el almidón conserva fibra, proteínas y minerales de la semilla. Esto se evidencia en un contenido de cenizas cercano al 2.45%, indicativo de baja refinación frente al método húmedo. (Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)
Riesgo de pardeamiento/ necesidad de aditivos	(Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) - Presenta alto riesgo de pardeamiento por oxidación. - Requiere obligatoriamente bisulfito de sodio para evitar oxidación. - Sin reactivo, la muestra se oscurece y no es posible extraer almidón estable.	Presenta alto riesgo de pardeamiento enzimático, debido a la oxidación de los grupos hidroxilos del almidón al contacto con oxígeno. Al no emplear aditivos antioxidantes, el material adquiere un color marrón oscuro y se ve afectada su estructura polimérica. (Mendoza Chipantasi, 2021)
Requerimientos de equipo	(Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) (Mendoza Chipantasi, 2021) - Licuadaora, filtros, vasos, pipetas, varilla. - Horno/estufa (secado largo). - Mortero/molino y tamiz. - Desecador.	Horno de secado, área fresca o refrigeración, cuchillos o cortadores, mortero o molino, tamices, balanza y desecador. No necesita sistemas de filtración, sedimentación ni decantación. (Armijos Quezada, 2021)
Ventajas	Alta pureza (bajo % de cenizas).	Alto rendimiento y bajo desperdicio.

Limitaciones

- Almidón más fino, uniforme y estable.
- Control del pardeamiento.
- Producto más adecuado para biopelículas (mejor textura, menor rugosidad).
- Aditivos accesibles y económicos.

(Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)

- Bajo rendimiento.
- Mayor tiempo y costo.
- Alta humedad final → más energía de secado.
- Más etapas → más pérdidas de material.
- Dependencia obligatoria de reactivos.

(Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)

- Simplicidad operativa y menor número de operaciones unitarias.
- Menor consumo de agua y energía.
- Bajo costo operativo.
- Mayor seguridad al no usar reactivos químicos.

(Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)

- Baja pureza y alto contenido de cenizas.
- Pardeamiento enzimático severo sin control químico.
- Producto menos refinado y de calidad limitada para aplicaciones exigentes, como la fabricación de biopelículas de alto desempeño.

(Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023) (Armijos Quezada, 2021)

Apéndice F. *Análisis de las variedades de aguacate reportadas como fuente de almidón.*

Tabla 3.

Contenido de almidón y rendimiento de extracción reportados para diferentes variedades de aguacate.

Variedad	Contenido de almidón reportado	Rendimiento de extracción reportado	Referencia
Lorena (Papelillo)	20.05 %; hasta 67.6 % Base Seca (32.4 % amilosa y 35.2 % amilopectina)	7–11 % (hasta 16 % en algunas condiciones)	(Armijos Quezada, 2021; Mendoza Chipantasi, 2021; Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)
Hass	27.28 -30 %	4.5 % Base Húmeda	(Merino, y otros, 2021; Rengifo Reyes & Téllez Espinosa, 2023)
Criolla	24.58 %		(Mongui Torres & Quintero Calderón, 2021)

Apéndice G. *Cálculo del contenido de humedad de la torta de almidón.*

El contenido de humedad de la torta de almidón se determinó conforme a la norma ISO 1666:1996, a partir de la diferencia de masa entre la torta húmeda obtenida tras la sedimentación y decantación, y la torta seca resultante del proceso de secado en horno a 65 °C.

Tabla 4.

Datos experimentales para contenido de humedad

Parámetro	Valor en g
Masa de la torta húmeda (WTH)	141.426 g
Masa de la torta seca (WTS)	50.4532 g

Remplazando los valores obtenidos en la *ecuación 1*:

$$\%H = \frac{141.426 - 50.4532}{141.426} \times 100 = 64.33 \%$$

Apéndice H. *Cálculo del rendimiento de extracción del almidón de semilla de aguacate.*

El rendimiento de extracción se calculó a partir de la relación entre la masa de almidón seco recuperado tras el proceso de secado y la masa total de materia prima procesada, expresada en términos de semilla de aguacate sin cáscara.

Tabla 5.

Datos experimentales para rendimiento

Parámetro	Valor
<i>Masa total de materia prima usada</i>	2272 g
<i>Masa final después del secado</i>	50.4532 g
<i>Masa obtenida tras molienda</i>	49.173 g
<i>Pérdidas durante el tamizado</i>	4.059 g
<i>Almidón aprovechable (fondos)</i>	45.086 g

Sustituyendo los valores experimentales en la *ecuación 2*, se obtiene:

$$\%R = \frac{50.4532}{2272} \times 100 = 2.22 \%$$

Apéndice I. *Cálculo de la densidad de las biopelículas.*

La densidad de las biopelículas se determinó mediante el método de desplazamiento de líquido, fundamentado en el principio de Arquímedes, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D792. Este método permite calcular el volumen de la muestra a partir de la diferencia entre su peso en aire y su peso aparente cuando está sumergida en agua, sin necesidad de medir directamente las dimensiones del material.

Tabla 6.*Variables medidas*

Variable	Descripción
$A+V+A$	Masa del sistema vaso + agua + alambre de soporte (g)
$A+V+A+B$	Masa del sistema vaso + agua + alambre + muestra sumergida (g)
<i>Masa sumergida</i>	Diferencia $(V+A+A+B) - (V+A+A)$: masa aparente de la muestra bajo el agua (g)

Datos experimentales y resultados**Tabla 7.**

Datos experimentales y resultados obtenidos para la determinación de la densidad de las biopelículas.

Muestra	Masa seca	A+V+A+B	A+V+A	Masa sumergida	GE	Densidad	Densidad Promedio
G.1.1	0.0972	138.3889	138.3387	0,0502	2.0681	2.0630	2.5521
G.1.2	0.1192	125.6565	125.5764	0,0801	3.0486	3.0412	
G.2.1	0.1678	127.4118	127.2951	0,1167	3.2838	3.2757	2.6427
G.2.2	0.1521	125.8577	125.7811	0,0766	2.0146	2.0097	

Tomando como ejemplo la biopelícula G.1.1 y aplicando las *ecuaciones 7 y 8*, los cálculos se desarrollan de la siguiente manera:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{0.0972}{0.0972 - (138.3889 - 138.3387)} = 2.0681$$

$$\rho = \left(\frac{0.0972}{0.0972 - (138.3889 - 138.3387)} \right) \cdot 0.9970 = 2.0630 \text{ g/cm}^3$$

El mismo procedimiento se aplicó para todas las muestras.

Apéndice J. *Cálculo del grado de hinchamiento de las biopelículas.*

El grado de hinchamiento se calculó a partir de la variación de masa de cada muestra antes y después de su inmersión en agua destilada durante 24 horas, permitiendo cuantificar la capacidad de absorción de agua de cada formulación.

Tabla 8.

Datos experimentales y resultados del grado de hinchamiento.

Muestra	Masa Inicial Seca	Masa hinchada	Masa Final seca	Grado de Hinchamiento
G.1	0.1236	1.2504	0.0757	1551.7834
G.2	0.1547	1.4211	0.0807	1660.9665

Aplicando la *Ecuación 9* a los datos experimentales de la biopelícula G.1, el desarrollo del cálculo es el siguiente:

$$GH(\%) = \left[\frac{(1.2504 - 0.1236)}{0.1236} \right] \times 100 = 1551.78 \%$$

El mismo procedimiento se aplicó para G.2, obteniendo un grado de hinchamiento de 1.660,97 %.

Apéndice K. *Cálculo de la pérdida de masa soluble de las biopelículas.*

La pérdida de masa soluble se determinó a partir de la diferencia entre la masa seca inicial de cada muestra y su masa seca final, obtenida tras la inmersión en agua destilada durante 24 horas y el posterior secado, permitiendo cuantificar la fracción de material que se disuelve al contacto con el medio acuoso.

Tabla 9.

Datos experimentales y resultados de la pérdida de masa

Muestra	Masa Inicial Seca	Masa hinchada	Masa Final seca	Pérdida de Masa soluble
G.1	0.1236	1.2504	0.0757	38.7540
G.2	0.1547	1.4211	0.0807	47.8345

Con base en la *Ecuación 10*, el cálculo correspondiente a la biopelícula G.1 se desarrolla de la siguiente manera:

$$PMS(\%) = \left[\frac{(0.1236 - 0.0757)}{0.1236} \right] \times 100 = 38.75 \%$$

El mismo procedimiento se aplicó para G.2, obteniendo una pérdida de masa soluble de 47,83 %.

Apéndice L. *Cálculo de las propiedades ópticas de las biopelículas (absorbancia, transmitancia, luz retenida y opacidad).*

Las propiedades ópticas de las biopelículas se evaluaron mediante espectrofotometría UV-Vis, determinando la absorbancia, la transmitancia, la luz retenida y la opacidad a partir de las mediciones realizadas a 600 nm, siguiendo la metodología propuesta por Quispe-Sánchez et al. (2026) para películas biodegradables elaboradas a partir de almidón de semilla de aguacate.

Tabla 10.

Datos experimentales de transmitancia y absorbancia

	Transmitancia	Absorbancia
G1	20.2%	0.69
	23.63%	0.63
	21.64%	0.66
Promedio	21.8%	0.66
G2	16.95%	0.77
	18.26%	0.74
	17.03%	0.77
Promedio	17.41%	0.76

Los valores para la biopelícula G.1 se obtuvo mediante la *Ecuación 11 y 13*, como se muestra a continuación:

$$Opacidad = \frac{0.66}{0.146} = 4.5$$

$$\%LR = 100 - 21.8 = 78.2 \%$$

Cálculo para G.2 (valor promedio)

$$Opacidad = \frac{0.76}{0.203} = 3.73$$

$$\%LR = 100 - 17.41 = 82.59 \%$$

Apéndice M. *Cálculo de las propiedades colorimétricas de las biopelículas (X, Y, Z, L*, a*, b*, índice de amarillez, índice de blancura y diferencia total de color).*

En este apéndice se presentan los datos empleados y los cálculos realizados para la obtención de las coordenadas tristímulo, así como de las coordenadas colorimétricas, el índice de amarillez, el índice de blancura y la diferencia total de color.

Los datos experimentales y los cálculos realizados para la obtención de las coordenadas tristímulo de la biopelícula G.1, empleando las *Ecuaciones 12* y de la *14 a 16*, se presentan en la Tabla 9

Tabla 11.

Cálculo de las coordenadas tristímulo de la biopelícula G.1.

G1									
Long Onda	Abs	Transmitancia	%	W_x	W_y	W_z	X	Y	Z
360	1.004	0.0991	9.908%	0	0	0.001	0.00000000	0.00000000	0.00009908
370	0.901	0.1256	12.560%	0.002	0	0.01	0.00025121	0.00000000	0.00125603
380	0.904	0.1247	12.474%	0.006	0	0.026	0.00074843	0.00000000	0.00324320
390	0.842	0.1439	14.388%	0.022	0.001	0.104	0.00316536	0.00014388	0.01496351
400	0.798	0.1592	15.922%	0.101	0.003	0.477	0.01608131	0.00047766	0.07594836
410	0.786	0.1637	16.368%	0.376	0.01	1.788	0.06154430	0.00163682	0.29266279
420	0.774	0.1683	16.827%	1.2	0.035	5.765	0.20192089	0.00588936	0.97006160
430	0.757	0.1750	17.498%	2.396	0.098	11.698	0.41926327	0.01714850	2.04697066
440	0.758	0.1746	17.458%	3.418	0.226	17.15	0.59672201	0.03945558	2.99408499
450	0.748	0.1786	17.865%	3.699	0.417	19.506	0.66082175	0.07449653	3.48472266
460	0.738	0.1828	18.281%	3.227	0.664	18.52	0.58992794	0.12138585	3.38564160
470	0.728	0.1871	18.707%	2.149	0.998	14.137	0.40200959	0.18669408	2.64458334
480	0.722	0.1897	18.967%	1.042	1.501	8.85	0.19763676	0.28469556	1.67858474
490	0.713	0.1936	19.364%	0.333	2.164	4.856	0.06448285	0.41904171	0.94032651
500	0.703	0.1982	19.815%	0.045	3.352	2.802	0.00891687	0.66420786	0.55522387
510	0.694	0.2023	20.230%	0.098	5.129	1.602	0.01982559	1.03760654	0.32408767
520	0.68	0.2089	20.893%	0.637	7.076	0.791	0.13308816	1.47838594	0.16526332
530	0.676	0.2109	21.086%	1.667	8.708	0.42	0.35150831	1.83619339	0.08856238
540	0.669	0.2143	21.429%	2.884	9.474	0.202	0.61800965	2.03017456	0.04328639
550	0.664	0.2168	21.677%	4.25	9.752	0.086	0.92127424	2.11394504	0.01864226

560	0.658	0.2198	21.979%	5.626	9.419	0.037	1.23651596	2.07016421	0.00813208
570	0.652	0.2228	22.284%	6.988	8.722	0.019	1.55723048	1.94364114	0.00423403
580	0.645	0.2265	22.646%	8.214	7.802	0.014	1.86017883	1.76687549	0.00317050
590	0.641	0.2286	22.856%	8.73	6.442	0.01	1.99532776	1.47238275	0.00228560
600	0.633	0.2328	23.281%	9.015	5.351	0.007	2.09877427	1.24576163	0.00162966
610	0.63	0.2344	23.442%	8.492	4.263	0.003	1.99071911	0.99934474	0.00070327
620	0.629	0.2350	23.496%	7.05	3.145	0.001	1.65649114	0.73895952	0.00023496
630	0.6211	0.2393	23.928%	5.124	2.113	0	1.22605265	0.50559119	0.00000000
640	0.617	0.2415	24.155%	3.516	1.373	0	0.84927603	0.33164277	0.00000000
650	0.615	0.2427	24.266%	2.167	0.818	0	0.52584641	0.19849671	0.00000000
660	0.61	0.2455	24.547%	1.252	0.463	0	0.30732956	0.11365302	0.00000000
670	0.607	0.2472	24.717%	0.678	0.248	0	0.16758290	0.06129876	0.00000000
680	0.603	0.2495	24.946%	0.341	0.124	0	0.08506568	0.03093297	0.00000000
690	0.594	0.2547	25.468%	0.153	0.055	0	0.03896650	0.01400757	0.00000000
700	0.594	0.2547	25.468%	0.076	0.027	0	0.01935591	0.00687644	0.00000000
710	0.59	0.2570	25.704%	0.04	0.014	0	0.01028158	0.00359855	0.00000000
720	0.585	0.2600	26.002%	0.018	0.006	0	0.00468029	0.00156010	0.00000000
730	0.582	0.2618	26.182%	0.009	0.003	0	0.00235636	0.00078545	0.00000000
740	0.578	0.2642	26.424%	0.005	0.002	0	0.00132120	0.00052848	0.00000000
750	0.574	0.2667	26.669%	0.002	0.001	0	0.00053337	0.00026669	0.00000000
760	0.57	0.2692	26.915%	0.001	0	0	0.00026915	0.00000000	0.00000000
770	0.566	0.2716	27.164%	0	0	0	0.00000000	0.00000000	0.00000000
780	0.556	0.2780	27.797%	0	0	0	0.00000000	0.00000000	0.00000000
Suma							20.9014	21.8179	19.7486

Los resultados correspondientes a la biopelícula G.2 se muestran en la Tabla 10.

Tabla 12.

Cálculo de las coordenadas tristímulo de la biopelícula G.2.

G2									
Long Onda	Abs	Transmitancia	T%	Wx	Wy	Wz	X	Y	Z
360	1.1	0.07943	7.943%	0	0	0.001	0	0	7.94328E-05
370	1.039	0.09141	9.141%	0.002	0	0.01	0.000182823	0	0.000914113
380	0.997	0.10069	10.069%	0.006	0	0.026	0.000604159	0	0.002618022
390	0.972	0.10666	10.666%	0.022	0.001	0.104	0.002346511	0.00010666	0.0110926
400	0.954	0.11117	11.117%	0.101	0.003	0.477	0.01122849	0.00033352	0.053029603
410	0.935	0.11614	11.614%	0.376	0.01	1.788	0.043670468	0.001161449	0.207667012
420	0.917	0.12106	12.106%	1.2	0.035	5.765	0.145271776	0.004237093	0.697909824
430	0.901	0.12560	12.560%	2.396	0.098	11.698	0.300944779	0.012309094	1.469303852
440	0.886	0.13002	13.002%	3.418	0.226	17.15	0.444397962	0.029383832	2.229790826
450	0.872	0.13428	13.428%	3.699	0.417	19.506	0.496688759	0.055993299	2.619197333
460	0.859	0.13836	13.836%	3.227	0.664	18.52	0.44647687	0.091868808	2.562364934
470	0.847	0.14223	14.223%	2.149	0.998	14.137	0.305658456	0.141948413	2.010746206
480	0.834	0.14655	14.655%	1.042	1.501	8.85	0.152710085	0.219978731	1.297009839
490	0.822	0.15066	15.066%	0.333	2.164	4.856	0.050170015	0.326029769	0.731608391
500	0.809	0.15524	15.524%	0.045	3.352	2.802	0.006985742	0.520360126	0.43497884
510	0.797	0.15959	15.959%	0.098	5.129	1.602	0.015639616	0.818526415	0.255659839
520	0.788	0.16293	16.293%	0.637	7.076	0.791	0.103786157	1.152889873	0.128877316
530	0.778	0.16672	16.672%	1.667	8.708	0.42	0.27793011	1.451838873	0.070024383
540	0.769	0.17022	17.022%	2.884	9.474	0.202	0.490902514	1.612624971	0.034383602
550	0.762	0.17298	17.298%	4.25	9.752	0.086	0.735171953	1.686916914	0.014876421
560	0.755	0.17579	17.579%	5.626	9.419	0.037	0.989007825	1.655788252	0.006504317
570	0.747	0.17906	17.906%	6.988	8.722	0.019	1.251275371	1.561766426	0.003402151
580	0.741	0.18155	18.155%	8.214	7.802	0.014	1.491264565	1.41646532	0.002541722
590	0.734	0.18450	18.450%	8.73	6.442	0.01	1.610698461	1.188558933	0.001845015
600	0.726	0.18793	18.793%	9.015	5.351	0.007	1.69420411	1.005622429	0.001315522
610	0.718	0.19143	19.143%	8.492	4.263	0.003	1.625586132	0.816047301	0.000574277
620	0.711	0.19454	19.454%	7.05	3.145	0.001	1.371478858	0.611815746	0.000194536
630	0.703	0.19815	19.815%	5.124	2.113	0	1.015334448	0.418696661	0
640	0.697	0.20091	20.091%	3.516	1.373	0	0.706397033	0.275848443	0
650	0.691	0.20370	20.370%	2.167	0.818	0	0.441427018	0.166630042	0

660	0.685	0.20654	20.654%	1.252	0.463	0	0.258585596	0.095627101	0
670	0.68	0.20893	20.893%	0.678	0.248	0	0.141654278	0.051814544	0
680	0.675	0.21135	21.135%	0.341	0.124	0	0.072069976	0.026207264	0
690	0.67	0.21380	21.380%	0.153	0.055	0	0.03271082	0.011758791	0
700	0.665	0.21627	21.627%	0.076	0.027	0	0.016436661	0.00583934	0
710	0.66	0.21878	21.878%	0.04	0.014	0	0.008751046	0.003062866	0
720	0.655	0.22131	22.131%	0.018	0.006	0	0.00398357	0.001327857	0
730	0.65	0.22387	22.387%	0.009	0.003	0	0.002014849	0.000671616	0
740	0.645	0.22646	22.646%	0.005	0.002	0	0.001132322	0.000452929	0
750	0.64	0.22909	22.909%	0.002	0.001	0	0.000458174	0.000229087	0
760	0.635	0.23174	23.174%	0.001	0	0	0.000231739	0	0
770	0.63	0.23442	23.442%	0	0	0	0	0	0
780	0.625	0.23714	23.714%	0	0	0	0	0	0
Suma							16.7655	17.4407	14.8485

A partir de las coordenadas tristímulo obtenidas para ambas formulaciones aplicando las *Ecuaciones 17 a 25*, se calcularon las coordenadas colorimétricas, el índice de amarillez, el índice de blancura y la diferencia total de color. A continuación, se presenta el desarrollo de los cálculos para la biopelícula G.1

$$t_x = \frac{20.9014}{95.047} = 0.2199$$

$$t_y = \frac{21.8179}{100.00} = 0.2182$$

$$t_z = \frac{19.7486}{108.883} = 0.1814$$

Como $t_{x,y,z} > 0.008856$

$$F(t_x) = 0.2199^{1/3} = 0.6036$$

$$F(t_y) = 0.2182^{1/3} = 0.6020$$

$$F(t_z) = 0.1814^{1/3} = 0.5661$$

Finalmente,

$$L^* = 116 \times 0.6020 - 16 = 53.833$$

$$a^* = 500 [0.6036 - 0.6020] = 0.7917$$

$$b^* = 200 [0.6020 - 0.5661] = 7.1912$$

Índice de amarillez

$$YI = \frac{100(1.2769 (20.9014) - 1.0592(19.7486))}{21.8179} = 26.4517$$

Índice de blancura

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - 53.833)^2 + (0.7917)^2 + (7.1912)^2} = 53.2699$$

Para la biopelícula G.2 se siguió el mismo procedimiento de cálculo. A continuación, se presentan las sustituciones numéricas correspondientes.

$$t_x = \frac{16.7655}{95.047} = 0.1764$$

$$t_y = \frac{17.4407}{100.00} = 0.1744$$

$$t_z = \frac{14.8485}{108.883} = 0.1364$$

$$F(t_x) = 0.1764^{1/3} = 0.5608$$

$$F(t_y) = 0.1744^{1/3} = 0.5587$$

$$F(t_z) = 0.1364^{1/3} = 0.5147$$

$$L^* = 116 \times 0.5587 - 16 = 48.8106$$

$$a^* = 500 [0.5608 - 0.5587] = 1.0553$$

$$b^* = 200 [0.5587 - 0.5147] = 8.7977$$

$$YI = \frac{100(1.2769 (16.7655) - 1.0592(14.8485))}{17.4407} = 32.5691$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - 48.8106)^2 + (1.0553)^2 + (8.7977)^2} = 48.6282$$

Diferencia total de color

La diferencia total de color se determinó a partir de las coordenadas colorimétricas obtenidas para las biopelículas G.1 y G.2 de acuerdo con la *Ecuación 26*:

$$\Delta E^* = \sqrt{(53.8333 - 48.8106)^2 + (0.7917 - 1.0553)^2 + (7.1912 - 8.7977)^2} = 5.27$$

Apéndice N. *Datos experimentales del ensayo de tracción obtenidos mediante la máquina universal de ensayos.*

Debido al volumen de datos registrados por el software de la Tensile Testing Machine modelo KJ-10065A durante los ensayos de tracción de las biopelículas, los cuales comprenden los valores punto a punto de fuerza y desplazamiento para cada una de las cuatro muestras evaluadas (G.1.1, G.1.2, G.2.1 y G.2.2), la totalidad de los datos experimentales se encuentra disponible para su consulta y descarga libre en el siguiente repositorio digital: [Datos experimentales del ensayo de tracción — Biopelícula a partir de almidón de semilla de aguacate.](#)

El conjunto de datos incluye las series completas de fuerza (N) vs. desplazamiento (mm) registradas durante cada ensayo, a partir de las cuales se calcularon los parámetros mecánicos reportados en la sección de resultados del presente trabajo.

Apéndice O. *Curvas esfuerzo-deformación de las biopelículas G.1.1, G.1.2, G.2.1 y G.2.2.*

Figura 6.

Curvas de esfuerzo-deformación de las réplicas individuales del grupo G.1 (10 g de glicerina).

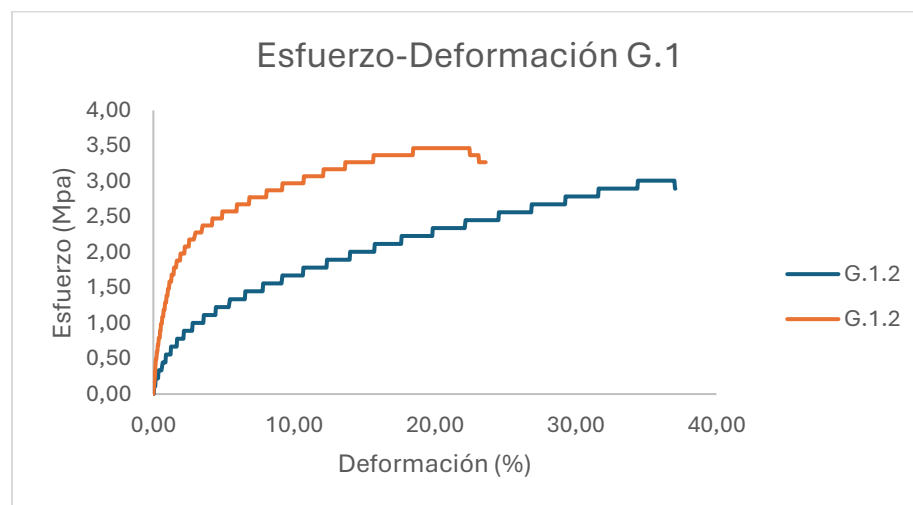


Figura 7.

Curva promedio de esfuerzo-deformación del grupo G.1 (10 g de glicerina).

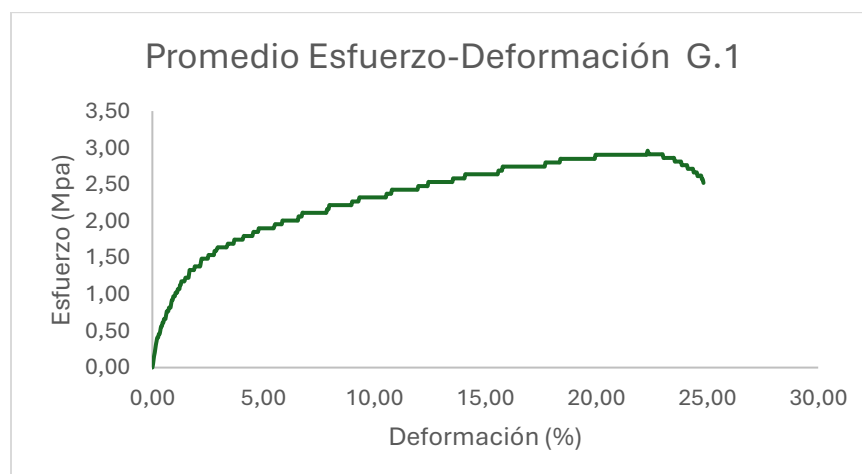
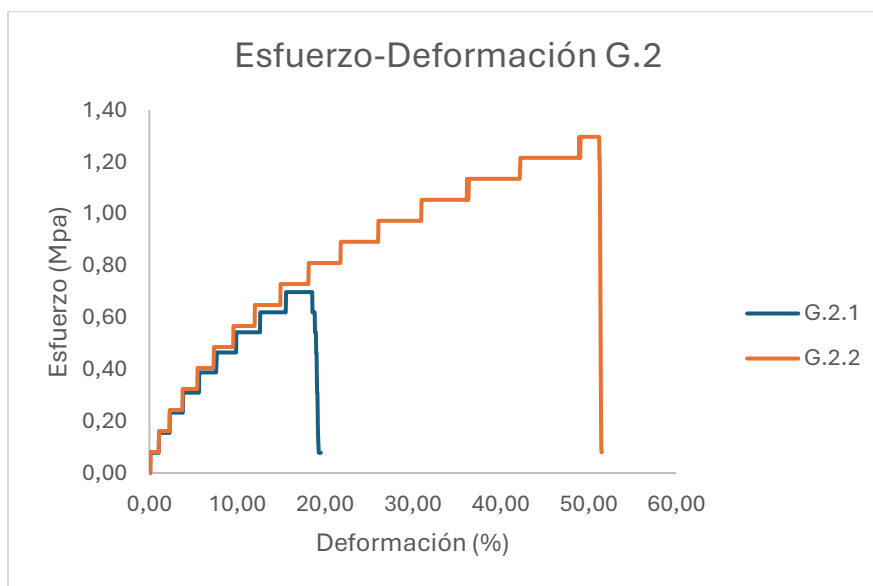
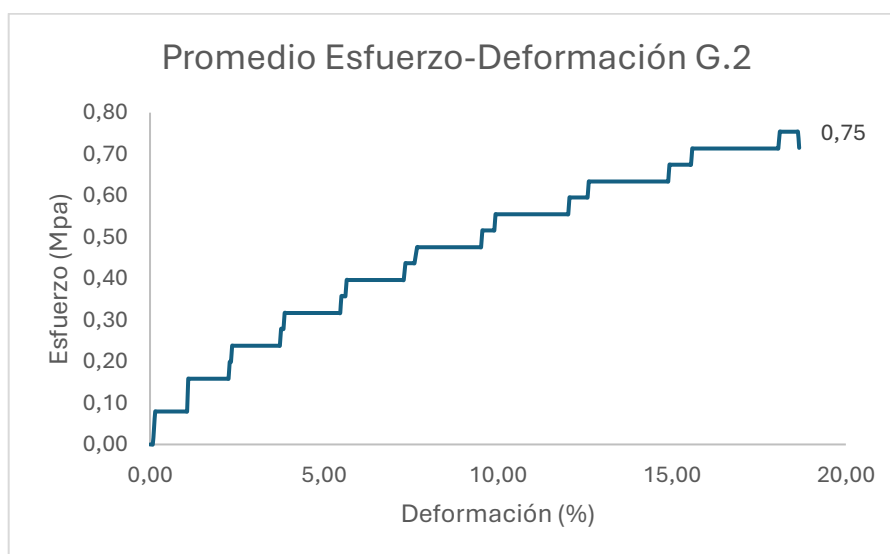


Figura 8.

Curvas de esfuerzo-deformación de las réplicas individuales del grupo G.2 (20 g de glicerina).


Figura 9.

Curva promedio de esfuerzo-deformación del grupo G.2 (20 g de glicerina).



Apéndice P. *Cálculo de las propiedades mecánicas de las biopelículas (resistencia a la tracción, elongación a la rotura y módulo de Young).*

Las propiedades mecánicas se determinaron a partir de los datos registrados durante los ensayos de tracción realizados en la *Tensile Testing Machine modelo KJ-10065A*. A continuación, se presenta el desarrollo del cálculo para la muestra G.1.1 como ejemplo representativo, seguido de los resultados consolidados para todas las muestras y los promedios por grupo.

Área de la sección transversal

De acuerdo con la *Ecuación 3*, el área transversal de cada probeta se calculó como el producto entre el ancho y el espesor promedio de la muestra:

$$A_0 = 55 \times 0.1608 = 8.8423 \text{ mm}^2$$

Tabla 13.

Área de la sección transversal de las probetas evaluadas

Muestra	Ancho (mm)	Espesor promedio (mm)	A ₀ (mm ²)
G.1.1	55	0.1608	8.8423
G.1.2		0.1862	10.2385
G.2.1		0.2315	12.7325
G.2.2		0.2292	12.6060
G.1 promedio		0.1735	9.5404
G.2 promedio		0.2304	11.4855

Resistencia a la tracción

Con base en la *Ecuación 4*, la resistencia a la tracción se obtuvo relacionando la fuerza máxima registrada durante el ensayo con el área transversal de la probeta:

$$\sigma_{max} = \frac{26.5}{8.8423} = 2.9970 \text{ Mpa}$$

Tabla 14.

Resistencia a la tracción de las biopelículas por muestra y promedio grupal.

Muestra	σ_{max} (Mpa)
G.1.1	2.9970
G.1.2	3.3501
G.2.1	0.6911
G.2.2	1.2454
G.1 promedio	3.1735
G.2 promedio	0.9683

Elongación a la rotura

Según la *Ecuación 5*, la elongación a la rotura expresa el porcentaje de deformación experimentado por la probeta desde su longitud inicial hasta el punto de fractura:

$$\varepsilon_b(\%) = \frac{(25.94 + 70) - 70}{70} * 100 = 37.0543 \%$$

Tabla 15.

Elongación a la rotura de las biopelículas por muestra y promedio grupal.

Muestra	ε_b (%)
G.1.1	37.0543
G.1.2	25.1829
G.2.1	19.0657
G.2.2	51.3429
G.1 promedio	31.1186
G.2 promedio	35.2043

Módulo de Young

El módulo de Young se determinó mediante la *Ecuación 6*, a partir de la pendiente de la región elástica de la curva esfuerzo-deformación, empleando los valores de esfuerzo inicial (σ_1) y deformación inicial (ε_1) registrados al inicio del ensayo, y los valores σ_2 y ε_2 correspondientes al límite de la zona lineal:

$$\sigma_1 = 0 \text{ y } \varepsilon_1 = 0; \sigma_2 = \frac{2}{8.8423} \text{ y } \varepsilon_2 = \frac{0.134}{70}$$

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{\frac{2}{8.8423} - 0}{\frac{0.134}{70} - 0} = 118.1565 \text{ Mpa}$$

Tabla 16.

Módulo de Young de las biopelículas por muestra y promedio grupal.

Muestra	E (Mpa)
<i>G.1.1</i>	118.1565
<i>G.1.2</i>	223.3408
<i>G.2.1</i>	18.6998
<i>G.2.2</i>	16.3803
<i>G.1 promedio</i>	170.7487
<i>G.2 promedio</i>	17.5400

Apéndice Q. *Modelo matemático asociado al diseño factorial 2¹ para la evaluación del efecto de la concentración de glicerina sobre las propiedades mecánicas de las biopelículas*

Con el propósito de cuantificar el efecto de la concentración de glicerina sobre las propiedades mecánicas de las biopelículas, se aplicó un diseño factorial 2¹, en el cual el

factor evaluado fue la cantidad de glicerina incorporada en la formulación, estableciendo dos niveles: nivel bajo (-1) correspondiente a G.1 y nivel alto (+1) correspondiente a G.2. Las variables de respuesta evaluadas fueron la resistencia a la tracción (σ_T), la elongación a la rotura y el módulo de Young (E).

El modelo matemático asociado a este diseño adopta la forma:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde $\hat{y}$ corresponde al valor estimado de la variable de respuesta, x al nivel codificado del factor (-1 o +1), b_0 a la media general del experimento y b_1 a la mitad del efecto del factor, es decir, el coeficiente que cuantifica cuánto cambia la respuesta por unidad de cambio en el nivel del factor.

Los resultados del modelo se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17.

Resultados del modelo matemático del diseño factorial 2^1 para las propiedades mecánicas de las biopelículas.

Parámetro	σ_T	Elongación	E
Media (b_0)	2.1178	33.1700	94.1444
Efecto glicerina	-2.2405	4.0680	-153.2086
b_1	-1.1203	2.0340	-76.6043
% cambio	-69.19	13.07	-89.73
Dirección efecto	Negativo	Positivo	Negativo

La media general (b_0) representa el valor promedio de cada propiedad considerando ambos niveles del factor. Para la resistencia a la tracción fue de 2.12 MPa, para la elongación de 33.17 % y para el módulo de Young de 94,14 MPa.

El efecto de la glicerina indica la magnitud del cambio en cada variable de respuesta al pasar del nivel bajo al nivel alto del factor. Un efecto negativo en σ_T (-2.24 MPa) y en E (-153.21 MPa) confirma que el aumento en la concentración de glicerina reduce tanto la resistencia como la rigidez de las biopelículas. Por su parte, el efecto positivo en la elongación (4.07 %) indica que una mayor concentración de glicerina incrementa la flexibilidad del material.

En términos porcentuales, el cambio más drástico se observó en el módulo de Young, con una reducción del 89.73 %, seguido de la resistencia a la tracción con una caída del 69.19 %. La elongación, en contraste, aumentó apenas un 13.07 %, lo que es consistente con lo discutido en la sección de propiedades mecánicas respecto a la capacidad limitada de la matriz para retener el exceso de glicerina durante el secado.

Tomando como referencia la *Ecuación 27*, las ecuaciones del modelo para cada variable de respuesta son:

$$\hat{y}(\sigma_T) = 2.1178 - 1.1203x$$

$$\hat{y}(\text{Elongación}) = 33.1700 + 2.0340x$$

$$\hat{y}(E) = 94.1444 - 76.6043x$$

El comportamiento conjunto de estas tres variables ante el cambio en la concentración de glicerina se ilustra en la Figura 10.

Figura 10.

Efecto de la concentración de glicerina sobre las propiedades mecánicas de las biopelículas.

