



**Extracción de celulosa y almidón de subproductos de aguacate Hass cultivado en el Oriente  
Antioqueño y su uso en la producción de biopelículas**

Yineth Mireya Olaya Garzón

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Ingeniero Químico

Asesora

Aída Luz Villa Holguín, Doctora (Ph.D) en Ciencias Biológicas

Coasesora

Marta Beatriz Mediavilla Quintero, Doctora en Ciencias Aplicadas a la Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Olaya Garzón [1]
<b>Referencia</b>  Estilo IEEE (2020)	[1] Olaya Garzón “Extracción de celulosa y almidón de subproductos de aguacate Hass cultivado en el Oriente Antioqueño y su uso en la producción de biopelículas”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Grupo de Investigación Catálisis Ambiental.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

A mis padres por creer en mí, por todo su apoyo, su amor y por ser ese ejemplo de fortaleza.

A mis hermanos por ser los mejores compañeros, amigos y cómplices.

A mi abuelo, por todo.

## **Agradecimientos**

A la Universidad de Antioquia por ser el espacio que me brindó las herramientas para mi formación profesional.

A cada persona del grupo de Catálisis Ambiental por recibirme con gran disposición y ser grandes compañeros durante la realización de este proyecto. A la profe Aída y la profe Marta por estar siempre dispuestas a aconsejarme, corregirme y compartir conmigo sus conocimientos.

Al CODI (Universidad de Antioquia) por la financiación del proyecto “Potencial y perspectivas de aprovechamiento del aceite y subproductos del aguacate en el Oriente Antioqueño”, 2023-62690, del cual hace parte este proyecto de investigación.

Por último, a todos aquellos con los que he compartido a lo largo de esta carrera por ser un apoyo y por darme voces de aliento e inspiración.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
I. INTRODUCCIÓN	15
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
A. Antecedentes	16
III. JUSTIFICACIÓN	17
IV. OBJETIVOS	18
A. Objetivo general	18
B. Objetivos específicos	18
V. HIPÓTESIS	19
A. Hipótesis de trabajo	19
B. Hipótesis estadística	19
VI. MARCO TEÓRICO	20
A. Almidón	20
1) Propiedades fisicoquímicas	21
2) Funcionalidad	22
3) Métodos de extracción del almidón	22
a) Método de extracción asistida por ultrasonido	22
b) Método de extracción húmedo	23
c) Método de extracción seco	24
B. Celulosa	25
1) Propiedades fisicoquímicas	26
2) Usos industriales	27
3) Métodos de extracción de celulosa	27
a) Método alcalino	27
C. Biopelículas	28
1) Biopolímeros	28
2) Propiedades	28
3) Obtención biopelículas	29
a) Casting	30

b) Coater	30
c) Extrusión	31
d) Electrospinning	31
4) Caracterización de las biopelículas	31
VII. METODOLOGÍA	32
A. Selección y adecuación de materia prima	32
B. Extracción del almidón	32
C. Extracción de celulosa	33
D. Biopelículas	33
E. Caracterización	35
1) FTIR	35
2) Prueba yodo	35
3) DSC	35
4) TGA	35
5) SEM	35
6) Pruebas adicionales	35
a) Porcentaje de humedad	36
b) Porcentaje de solubilidad	36
F. Diagramas de bloques, especificación de corrientes y consumo energético del proceso.	36
VIII. RESULTADOS	37
A. Adecuación de materia prima	37
1) Semillas	37
2) Cáscaras	38
B. Extracción del almidón	39
1) Extracción seco	39
2) Extracción húmeda	39
C. Extracción de celulosa	40
1) Semillas	40
2) Cáscaras	41
D. Formación de las biopelículas	41
E. Caracterizaciones	44

1) FTIR	44
a) Almidón	44
<i>b) Celulosa</i>	45
<i>c) Biopelículas</i>	48
2) Prueba de yodo	49
3) DSC	49
4) TGA	50
5) SEM	52
6) Pruebas adicionales	53
<i>a) Porcentaje de humedad</i>	53
<i>b) Porcentaje de solubilidad</i>	54
IX. DISCUSIÓN	55
A. Adecuación de la materia prima	55
B. Extracción de almidón	55
C. Extracción de celulosa	57
1) Semillas	57
2) Cáscaras	57
D. Biopelículas	57
1) Composición A	57
2) Composición B	57
3) Composición C	58
E. Caracterizaciones	58
1) FTIR	58
2) Yodo	59
3) DSC	59
4) TGA	59
5) SEM	59
6) Pruebas adicionales	59
a) Porcentaje de humedad	59
b) Porcentaje de solubilidad	60
F. Diagramas de bloques, especificación de corrientes y consumo energético del proceso.	60

1) Diagramas de bloques	60
a) Extracción del almidón	60
b) Extracción celulosa de la semilla: Proceso en serie con la extracción de almidón.	62
c) Extracción celulosa de la cáscara	62
d) Formación de biopelículas	63
2) Especificación de corrientes y consumo energético	64
a) Extracción de almidón	64
b) Extracción de celulosa de la semilla	65
c) Extracción de celulosa de la cáscara	66
d) Formación de biopelículas	67
X. CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS	71

## LISTA DE TABLAS

TABLA I: COMPOSICIONES PARA LA FORMACIÓN DE LAS BIOPELÍCULAS	34
TABLA II: FORMULACIONES PARA LAS BIOPELÍCULAS.	34
TABLA III: SEGUIMIENTO DEL PESO DE LAS SEMILLAS DE AGUACATE.	37
TABLA IV: %HUMEDAD DE LAS CÁSCARAS A TEMPERATURA AMBIENTE	38
TABLA V. % HUMEDAD DE LAS CÁSCARAS SEGÚN NORMA AOAC	38
TABLA VI: PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN EXTRACCIÓN SECA	39
TABLA VII: PORCENTAJES DE RENDIMIENTO EN EXTRACCIÓN HUMEDA.	40
TABLA VIII: BIOPELÍCULAS OBTENIDAS CON COMPOSICIONES A.	41
TABLA IX: BIOPELÍCULAS OBTENIDAS CON COMPOSICIONES BA.	42
TABLA X. BIOPELÍCULAS OBTENIDAS CON COMPOSICIONES BB.	43
TABLA XI. PORCENTAJE DE HUMEDAD BIOPELÍCULAS CON COMPOSICIÓN A.	53
TABLA XII. PORCENTAJE DE HUMEDAD BIOPELÍCULAS CON COMPOSICIÓN BA.	53
TABLA XIII. PORCENTAJE DE HUMEDAD BIOPELÍCULAS CON COMPOSICIÓN BB.	53
TABLA XIV. PORCENTAJE DE SOLUBILIDAD BIOPELÍCULAS COMPOSICIÓN A.	54
TABLA XV. PORCENTAJE DE SOLUBILIDAD BIOPELÍCULAS COMPOSICIÓN BA.	54
TABLA XVI. PORCENTAJE DE SOLUBILIDAD BIOPELÍCULAS COMPOSICIÓN BB.	54
TABLA XVII: LISTA DE CORRIENTES PARA EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN.	61
TABLA XVIII: LISTA DE CORRIENTES PARA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LA SEMILLA.	62
TABLA XIX: LISTA DE CORRIENTES PARA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LAS CÁSCARAS.	63
TABLA XX: LISTA DE CORRIENTES PARA LA FORMACIÓN DE LAS BIOPELÍCULAS.	64
TABLA XXI: ESPECIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE LAS SEMILLAS DE AGUACATE.	64
TABLA XXII: CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE LAS SEMILLAS.	65
TABLA XXIII: DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LAS SEMILLAS DE AGUACATE.	65

TABLA XXIV: CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LA SEMILLA.	66
TABLA XXV: DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LAS SEMILLAS DE AGUACATE.	66
TABLA XXVI: CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LA CÁSCARA.	67
TABLA XXVII: CONSUMO ENERGÉTICO PROMEDIO EN LA FORMACIÓN DE UNA BIOPELÍCULA.	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Amilosa, estructura molecular [16].	21
Figura 2. Amilopectina, estructura molecular [16].	21
Figura 3. Procesador ultrasónico (Modelo CPX750 ColeParmer Instruments Vernon Hills, Illinois U.S.A.) de 750 W con sonda de 20 kHz.	23
Figura 4. Esquema de proceso para extracción de almidón por método seco descrito en [8].	25
Figura 5. Estructura molecular de la celulosa [26].	26
Figura 6. Microfibrillas de celulosa [28].	26
Figura 7. Grado de madurez aguacate Hass [39].	32
Figura 8. Preparación de la solución filmogénica para las biopelículas.	34
Figura 9. Cáscaras (izquierda) semillas (derecha) de aguacate Hass lavadas.	37
Figura 10. Semillas después de los 6 días de secado.	38
Figura 11. Seguimiento del porcentaje de agua en las cáscaras de aguacate.	38
Figura 12. Semillas antes (izquierda) y después (derecha) del proceso del rallado	39
Figura 13. Semillas recién ralladas (izquierda). Semillas 1 min después del rallado (derecha).	39
Figura 14. Agua residual de la extracción húmeda.	40
Figura 15. Cambio de coloración de la mezcla durante la digestión de la lignina con NaOH.	40
Figura 16. Celulosa. Proceso sin blanqueo (izquierda), proceso con blanqueo (derecha).	41
Figura 17. Digestión de la lignina de las cáscaras del aguacate para la obtención de celulosa.	41
Figura 18. Solución resultante con celulosa.	44
Figura 19. Sólido obtenido después del proceso de secado.	44
Figura 20. FTIR almidón extraído de la semilla del aguacate.	45
Figura 21. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica.	45
Figura 22. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica y blanqueo.	46
Figura 23. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica e hidrólisis ácida.	46
Figura 24. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica, hidrólisis ácida y blanqueo.	47
Figura 25. Comparación resultados de FTIR para la celulosa extraída de la semilla. Celulosa con tratamiento básico (C1), celulosa con tratamiento básico y blanqueo (C2), celulosa con tratamiento básico e hidrólisis ácida (C3), celulosa con tratamiento básico, hidrólisis ácida y blanqueo (C4).	47

Figura 26. FTIR celulosa extraída de la cáscara con digestión básica.	48
Figura 27. FTIR biopelícula con almidón y celulosa extraída de la cáscara (composición BB).	48
Figura 28. Muestras de almidón extraído por metodo húmedo (H) y seco (S y O) y materia prima (M).	49
Figura 29. Muestras de almidón H, S, O y materia prima en suspensión acuosa.	49
Figura 30. Prueba de lugol en cada muestra de almidón extraído por metodo húmedo (H) y seco (S y O) y materia prima (M).	49
Figura 31. DSC realizado en el almidón extraído.	50
Figura 32. TGA de las cáscaras de aguacate Hass.	51
Figura 33. TGA de las semillas del aguacate Hass.	51
Figura 34. TGA de la celulosa extraída de las cáscaras del aguacate Hass.	52
Figura 35. TGA de la celulosa extraída de las semillas del aguacate Hass.	52
Figura 36. SEM de las biopelículas obtenidas en 500X, 2000X y 5000X para la composición A3 (a), composición BA3 (b) y composición BB3 (c).	53
Figura 37. Reacción de oxidación del catecol [49].	55
Figura 38. Etapas de la sedimentación [51].	56
Figura 39. Estructura del almidón [55].	58
Figura 40. Estructura de la celulosa [56].	58
Figura 41. Diagrama de bloques para el proceso de extracción de almidón.	61
Figura 42. Diagrama de bloques para el proceso de extracción de celulosa de las semillas de aguacate.	62
Figura 43. Diagrama de bloques para el proceso de extracción de celulosa de las cáscaras de aguacate.	63
Figura 44. Diagrama de bloques para el proceso de formación de las biopelículas.	64

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>FTIR</b>	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
<b>DSC</b>	Calorimetría diferencial de barrido
<b>TGA</b>	Análisis termogravimétrico
<b>AOAC</b>	Asociación científica dedicada a la excelencia analítica
<b>SEM</b>	Microscopía electrónica de barrido
<b>AFM</b>	Microscopía de fuerza atómica

## RESUMEN

El desarrollo de bioplásticos surge como una alternativa amigable con el medio ambiente para la sustitución de la producción de plásticos provenientes de fuentes fósiles. En esta investigación se obtuvo biopelículas a partir de almidón y celulosa que se extrajeron de semilla y cáscara de aguacate Hass cultivado en el Oriente Antioqueño. El almidón se extrajo de la semilla mediante método húmedo y seco, encontrándose un mayor rendimiento con el método seco y el agua como mejor extractor que el bisulfito de sodio. La celulosa se extrajo de la cáscara y la semilla por método alcalino, obteniéndose una mayor cantidad de celulosa de la cáscara. Los sólidos extraídos se caracterizaron mediante FTIR donde se identificaron bandas características de los grupos funcionales presentes, como la intensa banda en la zona de  $3200\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilos, lo que es fundamental para la estructura del almidón y celulosa; con el TGA, se registraron pérdidas de masa aproximadamente 80-90%, por la presencia de hemicelulosa, celulosa y lignina. Estos compuestos extraídos se utilizaron para formar biopelículas por el método casting, utilizando varias composiciones de almidón, celulosa, glicerol como plastificante y ácido acético como reticulante. Las biopelículas presentaron diferentes colores y características de rigidez dependiendo de la formulación utilizada, destacándose las biopelículas de la composición BA (0.1 g de celulosa, 0.1 g de celulosa, 0.25 g de glicerol, 10 g de ácido acético al 5%, 20 g de agua), por su uniformidad observada en el análisis SEM y por poseer buenas características de rigidez y elasticidad.

***Palabras clave* — Extracción, almidón, celulosa, biopelículas, aguacate Hass, semilla, cáscara.**

**ABSTRACT**

The development of bioplastics emerges as an environmentally friendly alternative to replace the production of plastics derived from fossil sources. In this research, biofilms were obtained from starch and cellulose extracted from the seeds and peels of Hass avocados cultivated in the Oriente Antioqueño region. Starch was extracted from the seeds using both wet and dry methods; with the dry method, better results were obtained using water instead of sodium bisulfite for extracting the starch. Cellulose was extracted from both the peel and the seeds using an alkaline method, resulting in a greater quantity of cellulose from the peel. The extracted solids were characterized using FTIR, showing characteristic bands of the functional groups as an intense band at  $3200\text{ cm}^{-1}$  that corresponds to the stretching vibrations of hydroxyl groups, which are fundamental to the structure of both starch and cellulose. TGA analysis showed mass losses of approximately 80-90% due to the presence of hemicellulose, cellulose, and lignin. These extracted compounds were used to form biofilms through the casting method, utilizing various compositions of starch, cellulose, glycerol as a plasticizer, and acetic acid as a crosslinking agent. The biofilms exhibited different colors and rigidity characteristics depending on the used formulation, with the BA (0.1 g of cellulose, 0.1 g of starch, 0.25 g of glycerol, 10 g of 5% acetic acid, 20 g of water), standing out for its uniformity observed in SEM analysis and for showing good rigidity and elasticity characteristics.

***Keywords* — Extraction, starch, cellulose, biofilms, Hass avocado, seed, peel.**

## I. INTRODUCCIÓN

El aguacate es reconocido por ser un superalimento y una fuente natural de energía gracias a su elevada cantidad de vitaminas y grasas saludables, además de encontrarse una gran variedad y tipos de aguacate; en Colombia por ejemplo se cultiva aguacate tipo Lorena, Hass, Trinidad, Trapo, Santana, entre otros. El aguacate Hass es la tercera fruta más exportada por el país, después del plátano y el banano. Los departamentos de Antioquia, Caldas, y Tolima representan el 51% del total del área sembrada de aguacate; la participación de Antioquia es del 23% del total nacional [1]. Durante los años 2017 y 2018, Antioquia fue uno de los departamentos que obtuvo mayor rendimiento, con un promedio de 15 toneladas por hectárea [2]. En el 2021 la producción fue de aproximadamente 1.687.768 toneladas de aguacate tipo Hass en Antioquia. Los desechos principales de la industria de procesamiento de aguacate son la cáscara y su semilla, los cuales constituyen entre el 11-16% y 14-24% del peso total del fruto, respectivamente [3].

Dentro de las opciones de aprovechamiento de estos residuos se han evaluado diferentes aplicaciones como la producción de bioetanol, la obtención de aceites esenciales, fabricación de biopolímeros, entre otras [4]. Los biopolímeros son materiales plásticos que difieren de los convencionales debido a que se obtienen de fuentes renovables y naturales, generalmente proceden de residuos agrícolas de celulosa o almidón, lo cual disminuye la dependencia industrial de las fuentes fósiles para la fabricación de estos materiales. Actualmente se ha evaluado la adopción de biopolímeros como potencial alternativo para reducir la contaminación ambiental y fomentar la innovación en varios campos de la industria promoviendo prácticas más sostenibles y responsables en un enfoque de economía circular para utilizar los recursos de manera más eficiente [5].

En esta investigación se realizaron extracciones, por diferentes métodos, de almidón y celulosa de los subproductos de aguacate Hass (semilla y cáscara) cultivados en el Oriente Antioqueño y se evaluó el rendimiento de las extracciones variando factores como el tamaño de partícula y el uso de diferentes medios extractores como el agua y el bisulfito de sodio para el caso de la extracción del almidón. Con los productos extraídos se obtuvieron biopelículas a las cuales se les identificaron algunas características físicas finales, tales como uniformidad de la apariencia, resistencia y flexibilidad.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el crecimiento en la conciencia sobre los impactos ambientales que tiene el uso de productos plásticos convencionales ha sido el motor de la búsqueda de alternativas sostenibles y biodegradables. En este contexto, se ha explorado el uso del almidón y celulosa extraídos de residuos de diferentes productos orgánicos como uno de los métodos de contribución a este problema en la formación de bioplásticos, además para contrarrestar la contaminación del suelo, del agua y a la emisión de gases de efecto invernadero que se generan durante la descomposición de estos residuos. Para el caso de los subproductos del aguacate Hass que es un producto de alto consumo y producción a nivel nacional, la semilla y la cáscara, que son la materia de la presente investigación, comprenden aproximadamente el 11-24% en peso del aguacate y son fuentes de almidón y celulosa.

### A. Antecedentes

La producción de películas bioplásticas a partir de polímeros naturales como el almidón ha sido reportada por autores como Phuong y colaboradores, quienes identificaron algunas características y propiedades que poseen estas películas dependiendo de la materia prima de la que se extrae el almidón; los autores reportaron descripciones generales de métodos de análisis para almidón y quitosano además de analizar algunas modificaciones en la composición de estos bioplásticos para mejorar algunas características [6]. En cuanto a la elaboración de las películas a partir de los subproductos del aguacate se tienen investigaciones como la propuesta por Rengifo & Tellez que utilizaron la semilla del aguacate tipo Lorena y la trataron mediante diferentes metodologías para la extracción del almidón y posteriormente para la formación de las películas haciendo uso de compuestos químicos como el glicerol, ácido acético y cítrico y variando las composiciones de estas con el fin de identificar la influencia de porcentaje de cada compuesto en la biopelícula final [7]. En el caso del aguacate tipo Hass se tiene el registro de biopelículas obtenidas por Castro con el uso de almidón y aceite extraído de la semilla; en este proyecto la autora evalúa diferencias entre el almidón extraído y un almidón comercial y respecto a las películas observa que después del secado de la solución filmogénica estas se fragmentan y no se obtiene un material uniforme [8].

### III. JUSTIFICACIÓN

Los plásticos de uso comercial son producidos en su mayoría con el uso de materiales fósiles, los cuales son difíciles de degradar y se convierten en un problema ambiental creciente puesto que se acumulan como desechos causando daños en los ecosistemas [9]. Como solución a esta problemática además de propuestas como las 5 R del reciclaje, se ha buscado la sustitución de estos materiales implementando los bioplásticos generados con productos y subproductos agrícolas. Dentro de este proyecto se presenta una oportunidad significativa de valorización de recursos agrícolas que son desechados como lo son los subproductos del aguacate Hass.

La cáscara y las semillas del aguacate representan una considerable fuente de residuos en la industria alimentaria y aprovechar estos materiales para la extracción de celulosa y almidón no solo reduce la carga ambiental al mitigar la acumulación de residuos, sino que también ofrece una alternativa sostenible en la producción de los plásticos convencionales, promoviendo así un modelo de economía circular al transformar residuos en productos de valor añadido. Además de los beneficios ambientales, la producción de biopelículas a partir de productos extraídos de residuos del aguacate podría tener un impacto positivo en la economía regional del Oriente Antioqueño al fomentar la innovación y la diversificación en la agricultura y la industria, teniendo en cuenta el crecimiento que se tiene en la producción de dicho producto en la región [10]. Las biopelículas obtenidas podrían aplicarse en diversas industrias como sustitución a los plásticos utilizados, además de impulsar la investigación en la extracción de celulosa y almidón de los residuos del aguacate.

#### IV. OBJETIVOS

*A. Objetivo general*

Producción de biopelículas a partir de subproductos de aguacate Hass cultivado en el Oriente Antioqueño.

*B. Objetivos específicos*

- Evaluar la eficiencia de extracción de almidón y celulosa de los subproductos de aguacate Hass (cáscara y semilla).
- Determinar el efecto de la composición de almidón y celulosa utilizadas en la preparación de biopelículas en las propiedades de estas.

## V. HIPÓTESIS

Los subproductos del aguacate Hass como las cáscaras y semillas son una buena fuente de celulosa y almidón, los cuales se pueden extraer mediante diferentes métodos para aplicarlos en la producción de biopelículas con propiedades que las hagan aptas para aplicaciones comerciales, contribuyendo así a la sustitución de plásticos convencionales por materiales más sostenibles y biodegradables.

### *A. Hipótesis de trabajo*

Se plantea la optimización de procesos de extracción de celulosa y almidón de los subproductos del aguacate Hass para la obtención de biopelículas. Se espera que con los diferentes métodos de extracción y con la incorporación de aditivos se formen biopelículas con propiedades que permitan la viabilidad para aplicaciones industriales y comerciales.

### *B. Hipótesis estadística*

Se espera que sea viable aplicar las biopelículas derivadas de los subproductos del aguacate como alternativa sostenible y eficiente en recubrimientos biodegradables.

1) *Hipótesis nula:* Los diferentes métodos de extracción de celulosa y almidón de los subproductos del aguacate Hass, así como la incorporación de aditivos, no mejoran las propiedades de las biopelículas obtenidas para aplicaciones industriales.

a) *Hipótesis alterna:* Con los procesos de extracción de celulosa y almidón de aguacate se obtendrán materias primas para la composición y formulación de biopelículas que impacten positivamente en la producción de plásticos con materiales biodegradables.

---

## VI. MARCO TEÓRICO

El aguacate Hass (*Persea americana*) es una variedad particular de aguacate conocida por su piel rugosa, su pulpa cremosa y sabor suave. La composición del aguacate Hass puede variar ligeramente dependiendo de factores como el tamaño, la madurez y las condiciones de crecimiento. Autores como Bressani y Rodríguez-Carpena [3] reportaron que la cáscara de aguacate cv. 'Hass' cultivados en Colombia y España, contiene alrededor del 75 % de humedad, mientras que la grasa y proteína varían del 1 al 2 %, según la región de cultivo del fruto, el contenido de cenizas es de 0.85 a 1.45 % y el contenido de fibra es relativamente alto (12.28 %). Apata & Olonghbo [11] reportan que la composición química de las semillas de aguacate es de 66.3 % de almidón, 4.9 % de proteína, 4.12 % de arabinosa y 3.3 % de pentosas, mientras que Sanchez & Loarca [12] reportan contenidos de aproximadamente 10.89 % en proteína, 20.45 % de humedad, 2.46 % cenizas, 8.79 % lípidos y 51.43 % de carbohidratos. Teniendo presente las diferencias reportadas para la composición de la semilla y cáscara por cada autor, además de los factores que pueden afectar la calidad, consistencia y composición del aguacate (metodología agrícola, cosecha, condiciones ambientales) se debe caracterizar la materia prima a utilizar con técnicas como microscopía, y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

### A. Almidón

El almidón es uno de los polisacáridos y biopolímeros naturales más abundantes de la naturaleza y está presente en todos los alimentos de origen vegetal. Es una mezcla de dos polisacáridos, amilosa y amilopectina, formados por unidades de glucosa [13]. Los gránulos de almidón tienen además regiones amorfas y cristalinas en donde la región cristalina tiene un alto grado de organización y se compone principalmente de amilopectina, mientras que la amorfa es rica en amilosa y tiene menor organización [14]. La amilosa es esencialmente un polímero lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1-4), en el cual algunos enlaces  $\alpha$  (1-6) pueden estar presentes, Figura 1. Esta molécula no es soluble en agua, pero puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrógeno y generar una estructura helicoidal que es capaz de desarrollar un color azul por la formación de un complejo con el yodo [15].

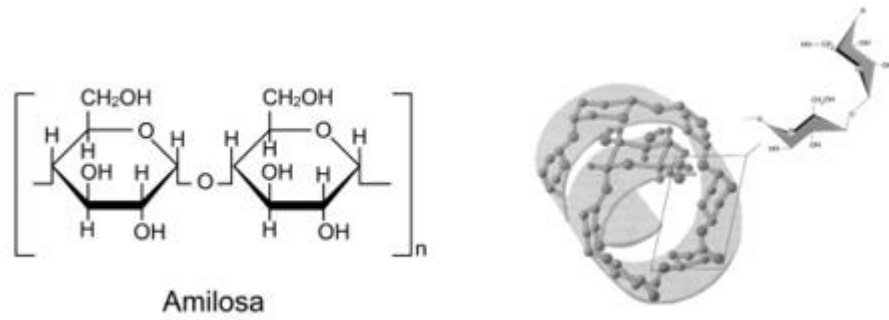


Figura 1. Amilosa, estructura molecular [16].

La amilopectina es un polímero ramificado de unidades de glucosa unidas en un 94- 96% por enlaces  $\alpha$  (1-4) y en un 4-6% con uniones  $\alpha$  (1-6), Figura 2. Dichas ramificaciones se localizan aproximadamente a cada 15-25 unidades de glucosa. La amilopectina es parcialmente soluble en agua caliente y en presencia de yodo produce un color rojizo violeta [15].

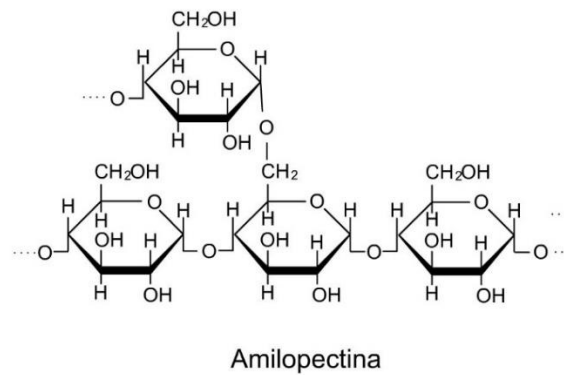


Figura 2. Amilopectina, estructura molecular [16].

1) *Propiedades fisicoquímicas:* Las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones están influenciadas por su estructura granular y molecular, esto les permite poder actuar en diferentes sistemas como espesante, estabilizante, gelificante, agente de retención de agua, etc, y puedan ser utilizados como aditivos en alimentos [17]. Dentro de esas propiedades fisicoquímicas que son las directas responsables de los usos industriales del almidón se tiene la gelatinización, que es una transición en la que se absorbe calor y se pasa de un estado ordenado a uno desordenado al romperse la estructura cristalina, esto genera cambios irreversibles en las propiedades del almidón como el hinchamiento del grano, la solubilidad, la viscosidad y la fusión de los cristalitas, todas propiedades dependientes de la temperatura y de la humedad. Se tiene además la retrogradación del almidón que es el fenómeno opuesto a la gelatinización, el cual hace referencia al comportamiento de recristalización de las moléculas de almidón durante un proceso de

enfriamiento. La velocidad de estas propiedades fisicoquímicas depende de diferentes variables como la relación molecular entre la amilosa y la amilopectina, la concentración del almidón, la fuente de este, entre otras [18].

2) *Funcionalidad*: El almidón tiene un papel fundamental en la biología vegetal ya que actúa como reserva principal de energía y proporciona soporte estructural, además de ser un componente importante dentro de la dieta humana y animal; es una fuente de carbohidratos que brinda energía. Industrialmente el almidón se considera como uno de los polímeros naturales más económicos, versátiles y abundantes; por tanto, es altamente utilizado en diferentes sectores, bien sea como un ingrediente funcional en gran variedad de productos alimenticios como espesante, texturizante o en aplicaciones farmacéuticas, textiles, en la obtención de biocombustibles, entre otras [18] [19].

### 3) *Métodos de extracción del almidón*:

a) *Método de extracción asistida por ultrasonido* [7]: Para el proceso de extracción del almidón se hace uso de un agente de extracción que en este caso es agua destilada y un equipo de ultrasonido en el cual se puede variar la potencia y el tiempo de extracción. Para la preparación de la materia prima se seleccionan y se separan los residuos del aguacate Hass, semilla y cáscara, que son la materia prima de interés a utilizar durante el proceso y se lavan adecuadamente; estos residuos se reducen de tamaño, por trituración o con un picado manual. Posteriormente la mezcla se somete al ultrasonido (Figura 4) y después se realiza un filtrado del producto, lavando hasta que no se observen residuos de almidón en el agua destilada (turbidez), dejando en reposo por aproximadamente 2-5 horas hasta que se forme el sedimento y se separa el sólido obtenido. Finalmente, el producto se deja secar a 45 °C hasta obtener el sólido seco [20]. El rendimiento de la extracción depende del tiempo al que la muestra es sometida al ultrasonido, así como de la potencia utilizada en el equipo.

Para la caracterización del almidón se realizan análisis fisicoquímicos en donde se evalúa su pH con un potenciómetro, la granulación con un micrómetro y la humedad haciendo uso de la diferencia de pesos en una estufa a 105 °C hasta obtener un valor constante. El rendimiento del proceso se calcula con la ecuación (1) en base al producto final y la materia prima utilizada.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Peso almidón obtenido}}{\text{Peso materia prima}} * 100 \quad (1)$$



Figura 3. Procesador ultrasónico (Modelo CPX750 ColeParmer Instruments Vernon Hills, Illinois U.S.A.) de 750 W con sonda de 20 khz.

b) Método de extracción húmedo [7]: Dentro de las técnicas de extracción de almidón más utilizadas se encuentra el proceso por vía húmeda, dentro de la cual se tiene la opción de implementar un medio de extracción ácido con el uso de ácido cítrico o bisulfito de sodio, un medio alcalino con hidróxido de sodio [21], o un medio neutro con el uso de agua destilada. La selección del medio se realiza en base a las características que se requieren o se prefieren para el producto final; al implementar un medio ácido se obtiene un almidón con un mayor contenido de amilosa y menores contenidos de proteína y fibra, mientras que al hacer uso del medio alcalino se obtiene el almidón con un menor contenido de amilosa y mayores contenidos de amilopectina, proteína y fibra. Para la extracción húmeda del almidón se comienza por la adecuación de la materia prima, se verifica que se encuentre en buen estado y se seca a temperatura ambiente por aproximadamente 5 días; posteriormente se retira la cáscara que recubre las semillas, se lavan para eliminar la mayor cantidad de residuos que puedan afectar el proceso y se reducen de tamaño con el uso de un cuchillo y se pesan. Se realiza un licuado de las semillas previamente cortadas en una proporción de 1 a 2 con agua y la solución según el medio escogido durante 2-3 minutos en una licuadora convencional. Cuando se tiene la mezcla se realiza un filtrado para la separación entre la solución y los residuos de la muestra obteniendo una suspensión almidón/agua, esta se deja sedimentar por un tiempo aproximado de 8 horas y se descarta cuidadosamente el sobrenadante, se realiza un lavado con agua del sólido obtenido y por decantación se elimina el exceso de líquido repitiendo ese proceso tres veces. Por último, se seca el sólido en un horno a 45 - 65 °C (el tiempo depende de la cantidad de sólido), se reduce de tamaño con ayuda de un mortero, se tamiza con una malla 100 y se pesa. Se determina el porcentaje de humedad de la muestra, utilizando el método descrito por la AOAC [22]

en el que se toman 10 g del sólido húmedo, se pesan y se llevan a una estufa a 110 °C hasta alcanzar un peso constante, el cálculo se realiza con la ecuación (2) y ecuación (3).

$$\%Materia\ seca = 100 * \frac{(P_f - P_v)}{P_m} \quad (2)$$

$$\%Humedad = 100 - Materia\ seca \quad (3)$$

Donde

$P_f$ : Peso final de la placa con la muestra

$P_v$ : Peso de la placa vacía

$P_m$ : Peso muestra húmeda

Se realiza, además, una prueba cualitativa a partir de una solución de yodo y yoduro potásico para verificar la presencia de almidón con un cambio de coloración (azul profundo o violeta) en la muestra al reaccionar con el yodo; esta coloración se presenta como prueba visible de la reacción química del almidón con el yodo presente en la solución del reactivo conocido como Lugol. Cuando el yodo se combina con el almidón en presencia de agua, se forma un complejo de inclusión; en este proceso, el yodo se inserta entre las hélices de glucosa del almidón y la formación de este complejo produce un cambio en la estructura de la molécula de almidón y a una modificación en las propiedades ópticas del sistema [23]. En la prueba, una muestra (3 g) del almidón obtenido se disuelve en 10 mL de agua destilada precalentada y se agregan 3-4 gota del reactivo yodo-yoduro de potasio [7].

c) Método de extracción seco [7]: Es uno de los métodos más utilizados industrialmente junto con el método húmedo, con la diferencia que en este proceso se requieren menos etapas y tiene como propósito la eliminación de la humedad presente en la materia prima. Se realiza la selección y el lavado de las semillas para eliminar residuos que contengan componentes externos e impurezas y se dejan secar a temperatura ambiente por 5 días; una vez las semillas están secas se pelan retirando la cáscara que las recubre y se reducen de tamaño bien sea manualmente con el uso de un cuchillo o con un molino de grano. Posteriormente, se llevan las semillas trituradas a un horno para secarlas a 65 °C por aproximadamente 2 días y se muelen en un mortero y tamizan (mallas 100, 90, 71 y 41 μm). El almidón obtenido se caracteriza con las pruebas listadas en la extracción húmeda, con la prueba del yodo y la determinación del % de humedad del sólido.

En el proceso descrito por Castro [8] se realiza la extracción del almidón del aguacate tipo Hass por medio de extracción en seco y la separación almidón-aceite, Figura 4. Se seleccionan y adecúan las semillas en un lavado con agua para retirar restos de pulpa; las semillas se trituran con el uso de un molino de grano y se dejan secar a temperatura ambiente por aproximadamente 48 h sobre un papel bond. Una vez pasado el tiempo de secado se vuelve a realizar un proceso de reducción de tamaño, esta vez con un molino de aspas y el sólido obtenido se tamiza con mallas de 125, 74, 53, 37, 25 y 15  $\mu\text{m}$  para obtener un tamaño de partícula homogéneo y similar al del almidón comercial, 6-15  $\mu\text{m}$ . En este caso, la autora realiza una separación almidón-aceite por el método soxhlet en el cual se emplea hexano como solvente y 10 recirculaciones a 80 °C en el equipo, luego se realiza una destilación simple del producto obteniendo aceite/hexano. Aunque no es un proceso necesario para la extracción del almidón porque el producto final de interés no se ve afectado, los autores realizan este paso para evaluar el aceite esencial obtenido como solvente para la formación de biopelículas. Por último, las partículas de almidón que se separan del aceite se secan durante 4 h a 85°C en un horno para eliminar las trazas de hexano que pueda contener el producto.

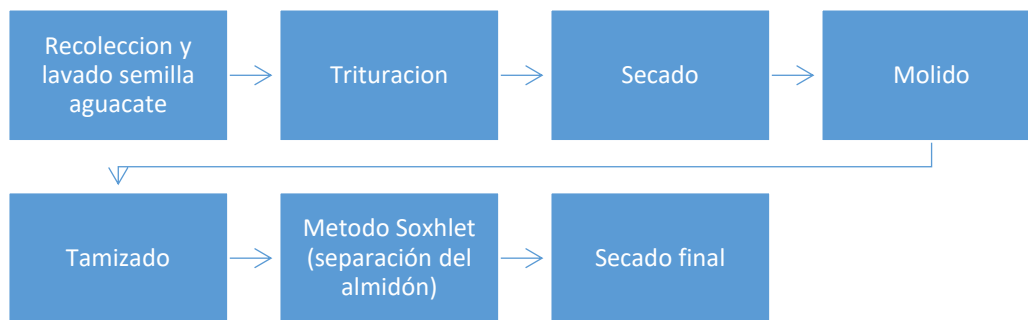


Figura 4. Esquema de proceso para extracción de almidón por método seco descrito en [8].

### *B. Celulosa*

La celulosa es un polímero natural que tiene como estructura enlaces 1,4- $\beta$  glucosídicos, Figura 5, es una estructura semicristalina que puede variar dependiendo del tipo de la fuente de la cual es aislada; por lo tanto, es posible obtener múltiples tipos de morfologías o estructuras, con propiedades físicas y mecánicas variadas [24]. Se diferencia de los polímeros sintéticos por su distintiva polifuncionalidad, su alta rigidez de cadena y su sensibilidad hacia la hidrólisis y oxidación de los grupos acetal formadores de cadenas, que determinan su química y uso. Actualmente, la celulosa es el polímero orgánico más común, representando alrededor de  $1.5 \times 10^{12}$  toneladas de la producción total anual de biomasa, y se considera una fuente casi inagotable de

materia prima para la creciente demanda de productos biocompatibles y respetuosos con el medio ambiente [25].

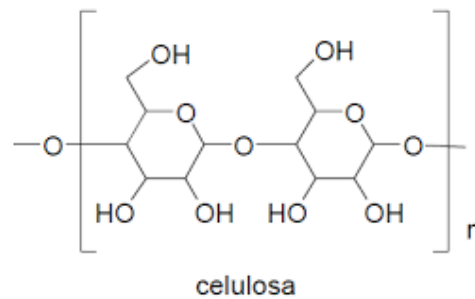


Figura 5. Estructura molecular de la celulosa [26].

La lignina, después de la celulosa y hemicelulosa, es el tercer biopolímero más abundante en la tierra. Este polímero se encuentra principalmente en la lámina media de la pared celular y en las capas de la pared celular, siendo un componente orgánico responsable de proporcionar rigidez y resistencia a las estructuras de celulosa. Con las hemicelulosas forman una matriz alrededor de las microfibrillas de celulosa tal como se presenta en la Figura 6, la estructura es macromolecular con unidades unidas por varios tipos de enlaces que no se repiten con cierta frecuencia, es decir, tiene una estructura tridimensional irregular [27].

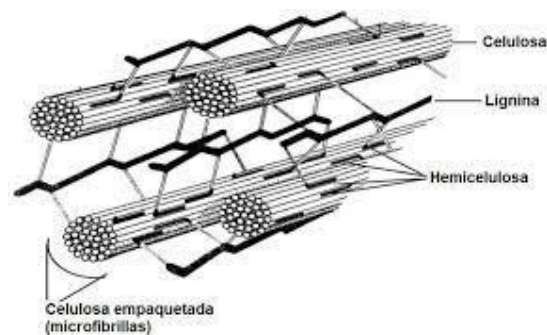


Figura 6. Microfibrillas de celulosa [28].

1) *Propiedades fisicoquímicas:* Las propiedades de la celulosa están determinadas por interacciones intermoleculares, reacciones de entrecruzamiento, longitudes de cadena, distribución de longitudes de cadena y por la distribución de grupos funcionales en las unidades repetidas y a lo largo de las cadenas poliméricas. La estructura molecular confiere a la celulosa sus propiedades características como hidrofiliidad, quiralidad, degradabilidad y amplia variabilidad química iniciada por la alta reactividad del donante de los grupos OH; también es la base de extensas redes de enlaces de hidrógeno, que dan a la celulosa una multitud de estructuras y morfologías de fibras

parcialmente cristalinas; por tanto, las propiedades de la celulosa están determinadas por un orden jerárquico definido en la estructura y organización supramolecular.

Aunque la celulosa es insoluble en agua, su hidrofiliidad se debe a la capacidad de retención de agua que tiene debido a su estructura porosa y por la afinidad para formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua. Su quiralidad supone diferentes interacciones biológicas que puede presentar con enzimas y otros componentes biológicos que participan en su degradación y metabolismo, además de influir en las propiedades mecánicas tanto de la celulosa como de los materiales derivados de esta. Su disposición tridimensional contribuye a la rigidez y resistencia por lo cual se obtiene un material estructuralmente fuerte [25].

2) *Usos industriales:* Hasta mediados de los años 70's del siglo XX la mayoría de las aplicaciones se encontraba dominada por las industrias de pulpa y papel, textil y sus derivados. Sin embargo, debido a la amplia capacidad de la celulosa como biopolímero y por las características de alta resistencia que posee, se han desarrollado aplicaciones como un subproducto en la elaboración de elementos de soldadura, materiales de construcción y en campos como el transporte y empaques. El desarrollo de sustancias como la celulosa microcristalina le ha permitido ser empleada como aditivo para alimentos y componentes farmacéuticos y en este punto las variaciones de los reforzantes a base de celulosa incluyen un amplio espectro de formulaciones que pueden ir desde fibras vegetales de menor nivel de comercialización en el mundo como el fique, hasta las más tradicionales en el mercado como el lino o el algodón [24].

### 3) *Métodos de extracción de celulosa:*

a) *Método alcalino:* Para la extracción de celulosa el método alcalino es el método convencional con el cual se elimina la lignina con un alto rendimiento. Para comenzar se hace necesario un pretratamiento de la materia prima con un lavado con agua para retirar restos de pulpa y residuos que estén presentes en las semillas y cáscaras, luego comienza un tratamiento de cocción o digestión de la lignina en un medio alcalino siendo NaOH y KOH al 10% los reactivos más utilizados para este proceso en una relación 1:4 – 1:6 con la materia prima y se somete a un calentamiento a 90 °C. Adicionalmente existe un método de disolución de la lignina conocido como método Kraft en el cual la digestión se realiza con una mezcla de NaOH 15 % p/v para degradar la lignina y Na<sub>2</sub>S 20% p/v para acelerar la reacción aproximadamente a 170 °C por un tiempo de 2 a 4 horas. Durante la digestión se produce la despolimerización de la lignina (ruptura de los enlaces

$\alpha$ - y  $\beta$ -aril éter) y de los enlaces entre lignina y carbohidratos que inicialmente es efectuada en las unidades fenólicas y posteriormente sobre las unidades no fenólicas [29].

Posteriormente se realiza un lavado para eliminar residuos químicos y se blanquea con el uso de agentes químicos oxidantes para eliminar los compuestos residuales y mejorar las propiedades físicas y estéticas del producto final, además, tiene el objetivo de refinar y aclarar la pulpa obtenida del despulpado, de tal forma que se elimina la lignina residual que se mantiene unido a la celulosa. El resultado del blanqueado es el brillo de la pulpa. La fibra de celulosa obtenida es sometida a una hidrólisis ácida con  $H_2SO_4$  al 0.4 %, seguido de una cloración y blanqueo con  $NaClO_2$  al 3.5 % y 0.5 % en donde se solubilizan los residuos de lignina. Finalmente se efectúan lavados hasta obtener un pH neutro y el producto se seca en una estufa de aire forzado a 65 °C por 24 h [30]. Moran J [31] reportó un proceso de blanqueo con lavados sucesivos con  $H_2O_2$ , controlando el pH de la solución en 11.5. Además, realizó un segundo tratamiento alcalino que tiene como objetivo la eliminación de lignina residual con  $NaOH$  y  $Na_2Br_4O_7$  a 28 °C por 15 h y finalmente realizó un tratamiento ácido para el blanqueo final y el ajuste de pH (7 - 9) del producto final con  $CH_3(COOH)$  y  $HNO_3$  en una relación de 10 a 1 por 15 minutos a 120 °C.

### *C. Biopelículas*

1) *Biopolímeros*: Los biopolímeros son compuestos con alto peso molecular, conformados por unidades de monómeros, los más abundantes son aquellos que se producen a partir de azúcares los cuales son muy variados en peso molecular. En cuanto a su degradación, los biopolímeros presentan ventajas significativamente positivas dado que suelen ser sintetizados con productos de origen renovable por lo cual al final de su vida útil, presentan cortos períodos de tiempo en su degradación, comparadas con los geopolímeros, ya que muestran tiempos de degradación más lentos, impactando en problemas sociales y ambientales. Dentro de las aplicaciones de los biopolímeros está la formación de una dieta alimenticia con alto contenido de fibra dietaria, las cuales aportan valores significativos de calorías y producen efectos benéficos sobre el índice glucémico y el perfil lipídico para quienes los consumen. También son útiles para recubrir productos comestibles o dar consistencia a un alimento procesado como el caso de las barras comestibles, pues permite que no se adhiera a su empaque secundario [32].

2) *Propiedades*: Para las biopelículas las propiedades mecánicas son una consecuencia directa de la composición, porque aspectos como el peso molecular, el tipo de enlaces químicos, la

organización y las interacciones intermoleculares del compuesto definen características como la elasticidad, la resistencia al impacto o la rigidez [18]. En el caso de las propiedades físicas de este tipo de materiales, se tienen algunas que son ópticas o la solubilidad bajo ciertos reactivos. La solubilidad de los polímeros es importante puesto que determina su resistencia ante determinados ambientes y la durabilidad de las películas dependiendo de su aplicación. La opacidad o la transparencia son propiedades ópticas las cuales están relacionadas con la estructura química y la morfología del material, siendo una característica importante porque muchas de estas biopelículas son utilizadas en recubrimientos y se requieren materiales que permitan el paso de la luz y que sean incoloros [33].

Al tratarse de un producto cuyas materias primas son de origen natural, las características y propiedades de las biopelículas van a depender de las materias primas, de las condiciones de operación con las que se realizó dicha película y factores como el espesor y las condiciones de almacenamiento. El efecto del espesor en las biopelículas le da al material un índice de permeación de gases o el vapor de agua, así mismo contribuye a factores como la rigidez y la flexibilidad de esta. El plastificante le confiere a la película algunos cambios en las propiedades mecánicas por la interacción que se da entre la materia prima de la película y el reactivo utilizado para dicha función, se prefieren aquellos de pequeño volumen con grupos polares distanciados entre sí en su molécula y preferiblemente de molécula lineal porque se difunden con mayor facilidad entre la matriz polimérica, además la naturaleza hidrofílica o hidrofóbica determina el efecto de barrera de la biopelícula (permeabilidad). Se tienen además algunos efectos por las condiciones de secado durante el proceso de elaboración de la película, puesto que como lo indica la Ley de Arrhenius, la difusividad de los gases y la permeabilidad de un material se ve afectado por la temperatura, aumentando exponencialmente con esta [34].

3) *Obtención biopelículas:* Para la elaboración de biopelículas se debe preparar una solución con la materia prima de la película y una formulación con un reticulante que genere cohesión en las cadenas poliméricas y aumente la movilidad molecular reforzando las propiedades mecánicas; además, para reforzar el almidón se pueden utilizar aditivos que favorezcan la formación de enlaces de hidrógeno y la estabilidad térmica de la biopelícula. Para la formación de la solución para la biopelícula basada en los residuos de la semilla de aguacate se utiliza glicerol dado que es un compuesto con una estructura que posee cadenas cortas y es de bajo peso molecular que reduce las

fuerzas de cohesión entre las cadenas del polímero, lo que facilita la deformación y el estiramiento de la película haciéndola estructuralmente más estable y con una mayor resistencia a la tracción, mejorando su flexibilidad [34]. En el caso de los aditivos es común usar ácido acético y ácido cítrico dado que se utilizan como agentes orgánicos de reticulación para películas de almidón por formar enlaces de hidrógeno con el almidón para mejorar la estabilidad térmica de la biopelícula. Se tienen tres etapas para la formación de las biopelículas: gelatinización, secado y almacenamiento. En la gelatinización se realiza el mezclado del almidón o la celulosa con los compuestos seleccionados como reticulante y aditivos; este mezclado se realiza en un baño termostático a 85 °C con agitación constante para asegurar la homogeneización de todos los compuestos. Una vez se tiene la solución, esta pasa a la formación de la película por métodos como casting, coater, extrusión o electrospinning. Posteriormente se realiza el proceso de secado dependiendo del método de formación de película seleccionado; por último, se tiene la etapa de almacenamiento en donde se espera que la lámina esté bien definida, seca y a temperatura ambiente para desmoldar y almacenar.

a) Casting: El método casting es un proceso utilizado para fabricar películas a partir de soluciones poliméricas o mezclas de polímeros, este método se utiliza en diversas aplicaciones industriales, incluyendo la fabricación de biopelículas, películas plásticas, películas de recubrimiento y películas para embalaje, entre otros. En este proceso se tiene lista previamente la solución o la mezcla con las composiciones específicas para la formación de la película; posteriormente se hace el “casting” que consiste en el vertimiento de la solución sobre una superficie plana como una placa de vidrio o una cinta transportadora, en una capa delgada y con características específicas (dimensiones) deseadas en el producto final. La aplicación de la solución se puede realizar manualmente o con vertidos automáticos, rodillos o sistema de recubrimiento. Para el secado se mantiene el molde bajo condiciones ambientales (el tiempo depende de las dimensiones de la película); por último, se puede realizar el corte de las películas en caso de ser necesario, ya que se obtiene la forma del molde [35].

b) Coater: Este proceso también conocido como fundición en tiras o revestimiento con cuchilla consiste en la aplicación delgada de una suspensión o solución previamente preparada para la formación de la película en un soporte grande y en correas de transporte continuo y permite el control del grosor y uniformidad de la película con una cuchilla ajustable en la parte inferior del

dispositivo de propagación, llamada cuchilla, eliminando los excesos de la película. En este caso, el secado se realiza en el soporte por conducción, convección o radiación [36].

c) Extrusión: En el proceso se utiliza uno o dos tornillos giratorios instalados en un barril para aumentar progresivamente la presión y empujar hacia adelante mezclando los ingredientes necesarios para fabricar el polímero comercial a través de una matriz donde se puede expandir [34]. Los rodillos se usan para ejercer presión sobre la lámina, corrigiendo posibles variaciones de espesor haciendo así la película más uniforme, además se le puede imprimir o definir una textura con los rodillos utilizados. En este caso la calidad de la película es afectada por las fuerzas de cizallamiento y las temperaturas tan elevadas del proceso (140-159 °C) [37].

d) Electrospinning: Esta técnica crea fibras de polímeros y aporta a las mismas una amplia superficie por unidad de área, porosidad y buenas propiedades mecánicas para el sector biotecnológico [38]. Consiste en hacer girar soluciones a través de campos eléctricos aplicando suficientes fuerzas eléctricas que superen las fuerzas de la tensión superficial de la mezcla cargada, se expulsan las fibras desde el capilar a un plato colector.

4) *Caracterización de las biopelículas*: Una de las caracterizaciones de las biopelículas es la microscopía óptica, la cual permite observar la morfología y estructura de las biopelículas a nivel microscópico. Se tiene además la microscopía SEM y AFM; en el caso de la SEM proporciona imágenes de la superficie de las biopelículas lo que permite observar detalles microestructurales y características de la superficie, mientras que la AFM permite analizar la topografía y las propiedades mecánicas de las biopelículas a nivel nanométrico, además se puede utilizar para medir la rugosidad superficial y la elasticidad de las biopelículas. Para identificar los grupos funcionales y analizar la composición química de las biopelículas se hace uso de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), además permite estudiar la presencia de componentes específicos. El análisis termogravimétrico (TGA) brinda información acerca de la estabilidad térmica y la descomposición de las biopelículas bajo condiciones controladas de temperatura y atmósfera y permite determinar la composición y la cantidad de materia orgánica e inorgánica en las biopelículas. Por último, algunos análisis de propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, la elasticidad y la rigidez, que se pueden evaluar utilizando pruebas de tracción, compresión y flexión [8].

## VII. METODOLOGÍA

### *Reactivos y materias primas utilizadas*

- 1) Semillas y cáscaras de aguacate Hass cultivados por Agrohorizontes en la finca San Rafael, vereda Rio Arriba, Sonsón - Antioquia.
- 2) Ácido acético,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (Merck 100% (glacial) CAS 64-19-7)
- 3) Glicerol,  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$  (PanReac 87% CAS 56-81-5)
- 4) Solución de Lugol,  $\text{I}_2/\text{KI}$  (Merck)
- 5) Bisulfito de sodio,  $\text{NaHSO}_3$  (Sigma Aldrich 58.5% CAS 7631-90-5)
- 6) Hidróxido de sodio,  $\text{NaOH}$  (PanReac CAS 1310-73-2)

### *A. Selección y adecuación de materia prima*

Se definió el grado de madurez 4 para la selección de los aguacates a utilizar para obtener los subproductos (cáscaras y semillas) teniendo como guía la Figura 7, la cual indica los grados de madurez del aguacate tipo Hass según el color de la cáscara y de la consistencia al tacto. A las cáscaras y las semillas del aguacate recolectadas, se le retiraron los restos de pulpa mediante un lavado con agua. El porcentaje de humedad se realizó con un seguimiento del peso durante 5 días y mediante el método AOAC a 105 °C hasta obtener peso constante. A la semilla después del secado se le retiró la cáscara que la recubría.



Figura 7. Grado de madurez aguacate Hass [39].

### *B. Extracción del almidón*

Para la obtención del almidón se siguieron los procedimientos en seco y húmedo, los cuales difieren exclusivamente en la adecuación de la materia prima y en su secado. Las semillas del aguacate se lavaron y se dejaron secar a temperatura ambiente por aproximadamente 12 h al sol, con el fin de retirar la cáscara que las cubría. Posteriormente se redujo de tamaño con el uso de un rallador. Para

el método húmedo (H), después del rallado, las semillas se trituraron para una segunda reducción de tamaño; en este procedimiento se evaluó la influencia del medio de extracción básico y ácido. Una muestra se trató con agua en una relación de 1:3 de sólido a volumen de agua; otra muestra se trató con la misma relación de sólido a agua y se adicionó bisulfito de sodio en relación 1:0.01 con el agua. Cada mezcla se agitó por 2 h a 300 rpm y después se filtró con un filtro de tela, el líquido se dejó decantar y los residuos sólidos se secaron en una estufa de convección a 80 °C por 6 h. En el método seco (S) se evaluó la influencia del tamaño de partícula en el rendimiento de la extracción, por tanto, después del rallado, las semillas se secaron en un horno a 60 °C por 6 h y se trituraron, en este punto se tiene la primera muestra con tamaños de partícula  $\geq 450 \mu\text{m}$ . Después se realizó una segunda trituración y se tamizó para la segunda muestra con los tamaños de partícula  $< 450 \mu\text{m}$ . Cada muestra se agregó en un beaker con agua en una relación 1:4, se agitó por 2 h a 300 rpm y después se filtró en un filtro de tela, el líquido se dejó decantar y los residuos sólidos se secaron en un horno de convección a 80 °C por 6 h.

#### *C. Extracción de celulosa*

Para la extracción de celulosa, se utilizó como materia prima los residuos sólidos secos de los procesos de extracción del almidón y las cáscaras del aguacate, las cuales se lavaron y se secaron a 70 °C por 8 h; posteriormente se trituraron. Se realizó la digestión de la lignina en una relación de 1:5 con NaOH al 1 % a 90 °C durante 10 min; luego se dejó enfriar, se lavó hasta pH = 7 y se secó en una estufa de aire forzado a 60 °C. La fibra de celulosa obtenida fue sometida a una hidrólisis ácida con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.4 % y un blanqueo con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 0.5 % en donde se solubilizaron los residuos de lignina, se realizaron lavados hasta obtener un pH neutro y el producto se secó en una estufa de aire forzado a 65 °C por 24 h. Finalmente el sólido obtenido se maceró y se tamizó a 90  $\mu\text{m}$ .

#### *D. Biopelículas*

Para la formación de las biopelículas se utilizó el proceso “casting” por su facilidad y adaptabilidad a nivel laboratorio e industrial. Primero se preparó la solución filmogénica con la mezcla de almidón-celulosa, el glicerol y el ácido acético que fue mezclada en un baño termostático a 85°C con agitación constante. La formulación de las soluciones filmogénicas para las biopelículas se realizó teniendo tres composiciones diferentes para la mezcla almidón-celulosa de acuerdo con la Tabla I.



Figura 8. Preparación de la solución filmogénica para las biopelículas.

TABLA I: COMPOSICIONES PARA LA FORMACIÓN DE LAS BIOPELÍCULAS

Composición	Almidón [%]	Celulosa [%]
A	100	0
B	50	50
C	0	100

Para la composición B como se tiene celulosa de dos fuentes (semilla y cáscaras) se realiza una película para cada caso siendo las composiciones BA las correspondientes a la celulosa de la semilla y las BB a la celulosa de la cáscara.

TABLA II: FORMULACIONES PARA LAS BIOPELICULAS.

Formulación	Almidón [g]	Celulosa [g]	Glicerol [mL]	Ácido acético 5% [mL]	Agua <sup>1</sup> [mL]
A1	0.500	0	0.25	10	50.0
A2	0.625	0	0.25	10	62.5
A3	0.750	0	0.25	10	75.0
A4	0.875	0	0.25	10	87.5
A5	1.000	0	0.25	10	100.0
BA1	0.250	0.250	0.25	10	50
BA2	0.500	0.500	0.25	10	100
BA3	0.100	0.100	0.25	10	20
BA4	0.150	0.150	0.25	10	30
BA5	0.200	0.200	0.25	10	40
BB1	0.250	0.250	0.25	10	50
BB2	0.500	0.500	0.25	10	100
BB3	0.250	0.250	0.5	10	50
BB4	0.375	0.375	0.5	10	75
BB5	0.500	0.500	0.5	10	100
C1	0	0.500	0.25	10	50
C2	0	1.000	0.25	10	100

<sup>1</sup>La cantidad de agua varía de acuerdo con la cantidad de almidón + celulosa en una relación de 1:100.

En el caso de la composición C, se repiten los extremos de las formulaciones ya trabajadas para la composición A.

Cada una de las soluciones filmogénicas obtenidas se colocaron en placas de vidrio (molde) para que se diera el proceso de secado a 20 °C durante 24 h aproximadamente y así se obtienen las biopelículas.

#### *E. Caracterización*

- 1) *FTIR*: Para el análisis de espectroscopía infrarroja se utilizó un espectrofotómetro Frontier FT-IR (PerkinElmer) Spectrum 65 y el accesorio DRIFT con dos celdas de muestreo, en una de las celdas se adicionó KBr puro como espectro de fondo (blanco) y en la otra celda la muestra diluida en KBr y se realizó el análisis en el intervalo de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ .
- 2) *Prueba yodo*: Se toman aproximadamente 0.5 g de muestra, se agregan 2 gotas de agua destilada y agita levemente para lograr una mejor dilución del reactivo indicador (Lugol), una vez se tiene la suspensión de la muestra se agregan 2 gotas de Lugol y se observa la coloración obtenida.
- 3) *DSC*: Este análisis se realizó para la muestra del almidón extraído en un microcalorímetro, Modelo: E/ $\mu$ DSC 7 Evo-1A en una atmósfera de nitrógeno y una velocidad de calentamiento de 5 °C/min en un rango de 10 a 115 °C, se pesó una muestra de 14.3 mg y se agregó agua con una micropipeta hasta alcanzar 85 % p/p de contenido de agua.
- 4) *TGA*: Se realizó en un TGA/DTA 5500 TA Instrument, bajo atmósfera de nitrógeno usando una velocidad de calentamiento de 10 °C/min hasta 107 °C manteniendo a esta temperatura por 5 min, luego se continuó el calentamiento a una velocidad de 20 °C/min hasta 900 °C manteniendo a esta temperatura por 7 min hasta 750°C y se mantuvo durante 2 horas. Se usó un porta-muestra de platino
- 5) *SEM*: Se tomaron muestras de las biopelículas las cuales se fijaron en una cinta de grafito con un recubrimiento delgado en oro y se analizaron en un microscopio electrónico de barrido en alto vacío Thermo Fisher Scientific modelo Scios 2 LoVac, en una resolución máxima de 5000X y una aceleración de tensión de 500V.
- 6) *Pruebas adicionales*: Para la caracterización de las biopelículas primero se realizó un análisis visual y de textura en cada película compuesta para observar su uniformidad y rugosidad; se identificaron visualmente características como el color y se realizaron pruebas mecánicas cualitativas para evaluar la fragilidad de la película y la elasticidad al someterse a una ligera tensión, además de determinar la humedad y el porcentaje de solubilidad de cada una.

- a) Porcentaje de humedad: Se tomaron muestras de aproximadamente 2 x 3 cm de cada biopelícula, se pesaron y se llevaron a la estufa a 115 °C hasta peso constante, realizando el seguimiento de las muestras cada hora.
- b) Porcentaje de solubilidad: Las muestras que se secaron para determinar el porcentaje de humedad se sumergieron en un beaker con 20 mL de agua destilada por 1 hora a 20 °C, se secaron nuevamente en un horno de convección a 115 °C hasta peso constante y se calculó la diferencia en masa de cada muestra (Ecuación 4).

$$\text{Porcentaje de solubilidad} = \frac{\text{Masa final} - \text{masa inicial}}{\text{masa inicial}} * 100 \quad (4)$$

*F. Diagramas de bloques, especificación de corrientes y consumo energético del proceso.*

Al tener planteada la metodología de extracción del almidón y la celulosa, así como de la producción de las biopelículas se realizaron los diagramas de proceso en donde se especifican las corrientes de entrada y salida, las operaciones unitarias aplicadas y el consumo energético de estas.

VIII. RESULTADOS

A. Adecuación de materia prima

Los subproductos del aguacate Hass (semillas y cáscaras) se lavaron para retirar restos de pulpa, Figura 9.



Figura 9. Cáscaras (izquierda) semillas (derecha) de aguacate Hass lavadas.

1) *Semillas*: Se realizó el lavado de las semillas del aguacate y se realizó seguimiento del porcentaje de agua que contenían tomando 6 semillas con tamaños diferentes, Tabla VII. El seguimiento se realizó por 5 días a temperatura ambiente, con el fin de obtener las semillas con un porcentaje de humedad menor y poder retirar la cáscara que las recubría.

TABLA III: SEGUIMIENTO DEL PESO DE LAS SEMILLAS DE AGUACATE.

Semilla	Día 1		Día 2		Día 3		Día 4		Día 5		Día 6	
	Peso [g]	Peso [g]	%H	Peso [g]	%H	Peso [g]	%H	Peso [g]	%H	Peso [g]	%H	
1	43.950	41.972	4.5	40.915	6.9	40.155	8.6	39.456	10.2	38.049	13.4	
2	31.758	30.491	4.0	29.690	6.5	29.138	8.3	28.606	9.9	27.477	13.5	
3	28.057	27.202	3.1	26.787	4.5	26.431	5.8	26.117	6.9	25.408	9.4	
4	23.252	22.479	3.3	22.177	4.6	21.923	5.7	21.710	6.6	21.267	8.5	
5	19.610	18.242	7.0	17.469	10.9	16.851	14.1	16.274	17.0	15.063	23.2	
6	10.013	9.061	9.5	8.526	14.9	8.101	19.1	7.721	22.9	6.989	30.2	
Promedio	26.107	24.908	5.2	24.261	8.1	23.766	10.3	23.314	12.3	22.376	16.4	
Desviación estándar	10.516	10.239	2.3	10.094	3.7	10.010	4.8	9.931	5.9	9.767	7.8	

El porcentaje de humedad (%H) se evaluó respecto a la variación del peso de cada semilla teniendo en cuenta el peso inicial (Ecuación 5).

$$\%H = \frac{Peso_{día1} - Peso_{día n}}{Peso_{día 1}} * 100 \quad (5)$$



Figura 10. Semillas después de los 6 días de secado.

2) *Cáscaras*: Para el cálculo del porcentaje de humedad de las cáscaras se utilizaron dos procedimientos; secando a temperatura ambiente y en una estufa a 105 °C siguiendo la norma AOAC y pesando las muestras en diferentes tiempos.

TABLA IV: %HUMEDAD DE LAS CÁSCARAS A TEMPERATURA AMBIENTE

Día	Peso [g]	% Humedad
1	151.7157	0.00
2	73.7443	51.44
3	48.9405	67.80
4	33.3654	78.08
5	30.4252	80.00

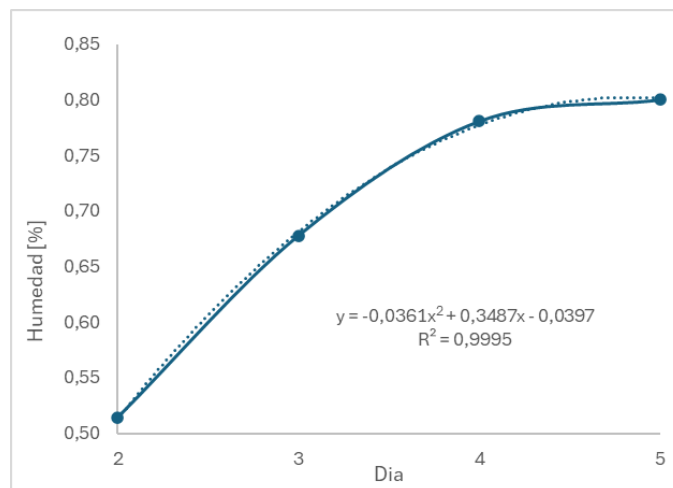


Figura 11. Seguimiento del porcentaje de agua en las cáscaras de aguacate.

TABLA V. % HUMEDAD DE LAS CÁSCARAS SEGÚN NORMA AOAC

Peso [g]				%Humedad
t <sub>0</sub> [0 h]	t <sub>1</sub> [4 h]	t <sub>2</sub> [5 h]	t <sub>3</sub> [18 h]	
1.81	0.38	0.38	0.38	79.01
2.4	0.49	0.48	0.48	80.00
3.35	0.6	0.6	0.6	82.09

$$\%Humedad_{prom} = 80.37$$

*B. Extracción del almidón*

Al retirar la cáscara que recubre las semillas y realizar la reducción de tamaño se observó un cambio en la coloración de las semillas, pasando de un color crema claro a un rojizo intenso, Figura 12 y Figura 13. El material contenía un porcentaje de humedad de 60.9 %.



Figura 12. Semillas antes (izquierda) y después (derecha) del proceso del rallado



Figura 13. Semillas recién ralladas (izquierda). Semillas 1 min después del rallado (derecha).

1) *Extracción seco*: Para la extracción en seco donde se compara el rendimiento en función del tamaño de partícula se obtienen los datos registrados en la Tabla VI, en la cual se observa que se tiene un rendimiento mayor con solo una trituración y con tamaños de partícula mayores.

**TABLA VI: PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN EXTRACCIÓN SECA**

Muestra semillas [g]	Tamaño partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Almidón [g]	Rendimiento [%]
120	$\geq 425$	11.56	9.63
120	$\leq 425$	3.06	2.55

2) *Extracción húmeda*: En este caso se obtiene la comparación en el rendimiento de la extracción del almidón al utilizar un medio extractor diferente. Como se muestra en la Tabla VII se obtiene un porcentaje de almidón mayor con el método extractor neutro (agua destilada), además de obtener el líquido residual en tonos diferentes.

TABLA VII: PORCENTAJES DE RENDIMIENTO EN EXTRACCIÓN HUMEDA.

Muestra semillas [g]	Agua [mL]	NaHSO <sub>3</sub> [mL]	Almidón [g]	Rendimiento [%]	Color del extracto
120	360	0	8.36	6.97	Naranja intenso
120	360	1.2	7.34	6.12	Amarillo



Figura 14. Agua residual de la extracción húmeda. Muestra sin NaHSO<sub>3</sub> (izquierda), muestra con NaHSO<sub>3</sub> (derecha).

### C. Extracción de celulosa

1) *Semillas*: Al realizar la agitación de la mezcla con el NaOH para la digestión de la lignina se observa un cambio en la coloración y la densidad de esta, en donde se obtiene una solución de color vinotinto intenso, Figura 15.



Figura 15. Cambio de coloración de la mezcla durante la digestión de la lignina con NaOH.

Después del secado se obtuvo un sólido oscuro con un porcentaje de rendimiento de extracción del 42.36 %. Al sólido obtenido se le realizó la hidrólisis ácida con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.4 %, sin observarse cambios significativos de coloración en el sólido, aunque la solución si se tiñó de color vinotinto. Finalmente, con en el proceso de blanqueo con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> el sólido se aclaró levemente, pero sin presentar cambios significativos en el color, Figura 16.

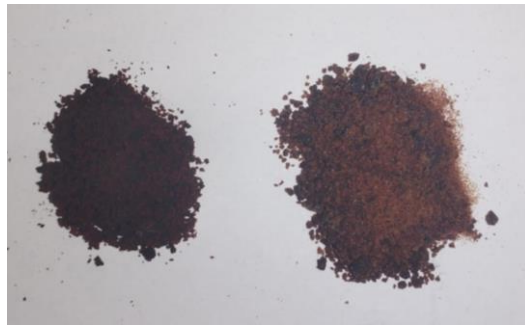


Figura 16. Celulosa. Proceso sin blanqueo (izquierda), proceso con blanqueo (derecha).

2) *Cáscaras*: Se realizó la digestión de la lignina con el mismo procedimiento básico con NaOH realizado en las semillas y se obtuvo una solución similar. Las diferencias se debieron principalmente en que se obtuvo una mezcla más grumosa y con un tono más oscuro, casi negro, Figura 17; además, se obtuvo un rendimiento del 62.06 %. En este caso, no se realizó la hidrólisis ácida ni el blanqueo.








Figura 17. Digestión de la lignina de las cáscaras del aguacate para la obtención de celulosa.

#### D. Formación de las biopelículas

Se comenzó con las películas de la composición A (almidón 100%) y se obtuvo películas uniformes con una apariencia y características visuales similares, Tabla VIII.

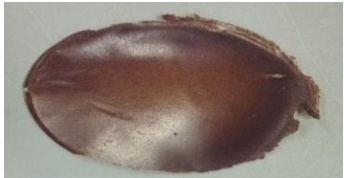
TABLA VIII: BIOPELÍCULAS OBTENIDAS CON COMPOSICIONES A.

Formulación	Observaciones	Imagen
A1	Coloración amarillo claro. Levemente elástica. Lado brillante (pegajoso) y un lado opaco. Se pega ligeramente al molde.	

A2	<p>Coloración amarillo claro. Levemente elástica. Lado brillante (pegajoso) y un lado opaco. Se pega ligeramente al molde.</p>	
A3	<p>Coloración amarillo claro. Levemente elástica. Lado brillante (pegajoso) y un lado opaco. Se pega ligeramente al molde.</p>	
A4	<p>Coloración amarillo claro. Levemente elástica. Lado brillante (ligeramente pegajoso) y un lado opaco. Se despega fácilmente del molde.</p>	
A5	<p>Coloración amarillo claro. Levemente elástica. Lado brillante (algo pegajoso) y un lado opaco. Se despega fácilmente del molde.</p>	



En las películas de la composición B (almidón-celulosa 50-50%) se observan algunos puntos de color café; en la tabla XI se observan las películas obtenidas con la celulosa extraída de las semillas. De acuerdo con los resultados de las composiciones B, para la celulosa extraída de la semilla se decide disminuir la cantidad de la mezcla almidón-celulosa. Para el caso de la celulosa extraída de las cáscaras (Tabla IX) se aumenta la cantidad de glicerol para disminuir la rigidez de las películas debido a que con las primeras formulaciones no se formó una película ya que al realizar el proceso de secado la solución se vuelve muy rígida, frágil, se enrosca y se parte al intentar manipularla.

TABLA IX: BIOPELÍCULAS OBTENIDAS CON COMPOSICIONES BA.

Formulación	Observaciones	Imagen
BA1	<p>Película café oscura. Lado brillante y un lado opaco. Uniforme. Levemente resistente. Se desmolda fácilmente</p>	

BA2	<p>Película café oscura. Lado brillante y un lado opaco. Uniforme. Frágil. Se desmolda fácilmente.</p>	
BA3	<p>Película café clara. Lado brillante y un lado opaco. Color no uniforme (se observan gránulos de celulosa) Levemente elástica. Frágil.</p>	
BA4	<p>Película café clara. Lado brillante y un lado opaco. Color no uniforme (se observan gránulos de celulosa) Levemente elástica.</p>	
BA5	<p>Película café clara. Lado brillante (pegajoso) y un lado opaco. Color no uniforme (se observan gránulos de celulosa) Levemente elástica.</p>	

TABLA X. BIOPELÍCULAS OBTENIDAS CON COMPOSICIONES BB.

Formulación	Observaciones	Imagen
BB1/BB2	No se observa la formación de una película	
BB3	<p>Película café oscura. Lado brillante y un lado opaco. Color no uniforme. Resistente al manipularla. Se desmolda fácilmente.</p>	
BB4	<p>Película café oscura. Lado brillante y un lado opaco. Color no uniforme. Resistente al manipularla. Rígida, Se desmolda fácilmente.</p>	

BB5  
Película café oscura. Lado brillante con zonas opacas y otro lado completamente opaco. Color no uniforme. Resistente al manipularla. Rígida. Se desmolda fácilmente.



Para las composiciones C (celulosa 100%) se encuentra que con la metodología planteada no se logra obtener una solución filmogénica y que por el contrario la celulosa se precipita y al dejar secar se observa la fractura y separación del material obteniendo un sólido.

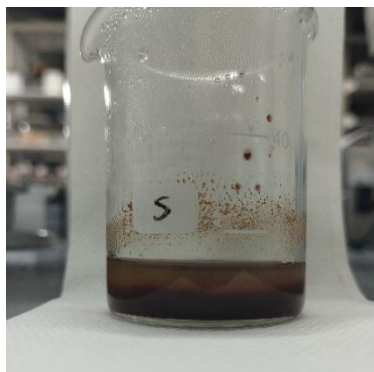


Figura 18. Solución resultante con celulosa.

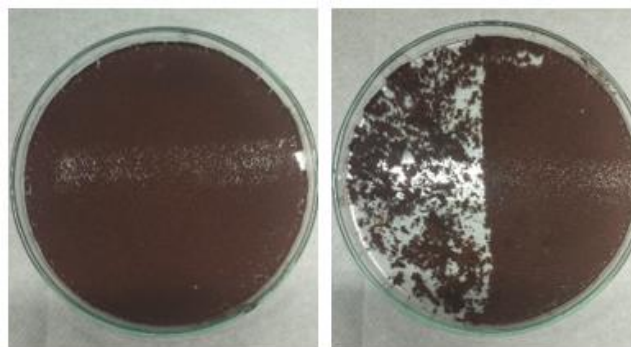


Figura 19. Sólido obtenido después del proceso de secado.

## E. Caracterizaciones

### 1) FTIR

a) Almidón: Los resultados de la Figura 20 muestran la banda intensa en  $3208\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilos la cual es una característica importante de la estructura del almidón [40]. La banda a  $2930\text{ cm}^{-1}$  se debe a las vibraciones de tensión del enlace C-H y las de  $1150$  y  $1075\text{ cm}^{-1}$  a las vibraciones de los enlaces C-O-C asociadas al anillo de la glucopiranososa (anillo de glucosa con 6 átomos). En el caso de la

banda en  $1640\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la vibración por flexión del grupo O-H que proviene del agua intermolecular contenida en el almidón y que indica su higroscopicidad y en  $1001\text{ cm}^{-1}$  el estiramiento del enlace C-O-H. Al final de la figura en la zona menor a los  $1000\text{ cm}^{-1}$  se observan las bandas de  $933$  y  $862\text{ cm}^{-1}$  correspondientes al anillo de la piranosa que es la forma en la que la glucosa del almidón se encuentra organizada [41].

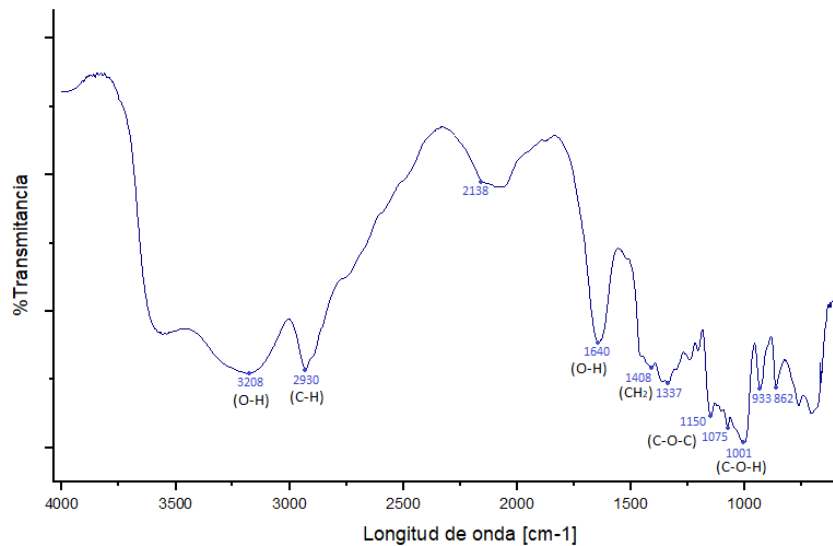


Figura 20. FTIR almidón extraído de la semilla del aguacate.

b) *Celulosa*: Al realizar la digestión de la lignina con el NaOH de la semilla del aguacate se obtienen señales similares a las obtenidas en el FTIR del almidón. En la Figura 21 se observa el espectro y las bandas características.

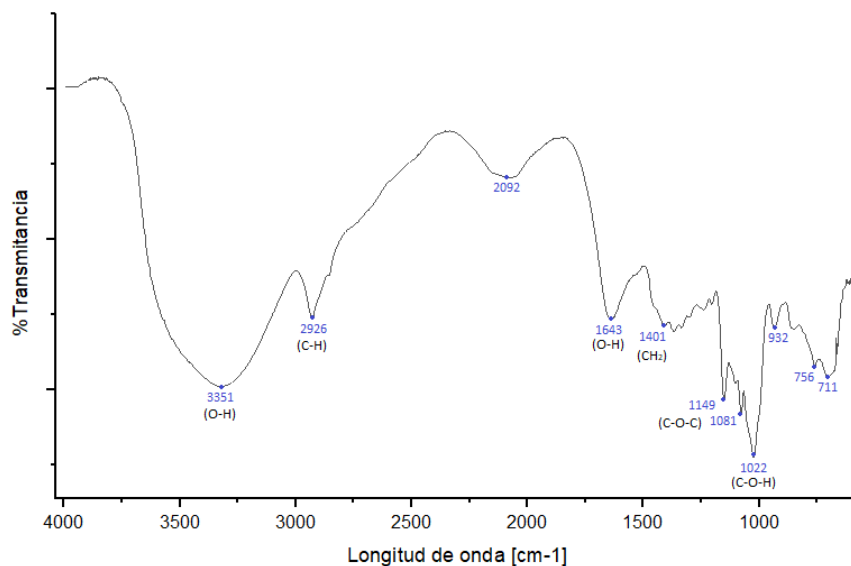


Figura 21. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica.

Una vez se realiza la hidrólisis ácida (Figura 22) se observa que la intensidad de las bandas disminuye significativamente, lo cual puede deberse a la degradación de la hemicelulosa presente en la muestra, esto debido a que es más susceptible al ataque con ácidos diluidos que la celulosa [42]. Lo que también se observa al realizar el blanqueo de la muestra (Figura 23) por lo que se infiere que estos procesos químicos eliminan compuestos residuales como hemicelulosa o lignina de la celulosa extraída [43].

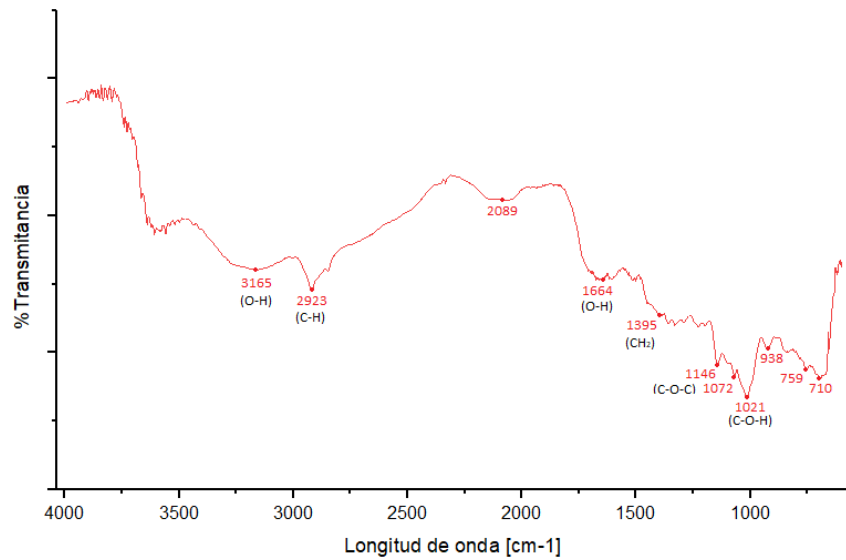


Figura 22. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica y blanqueo.

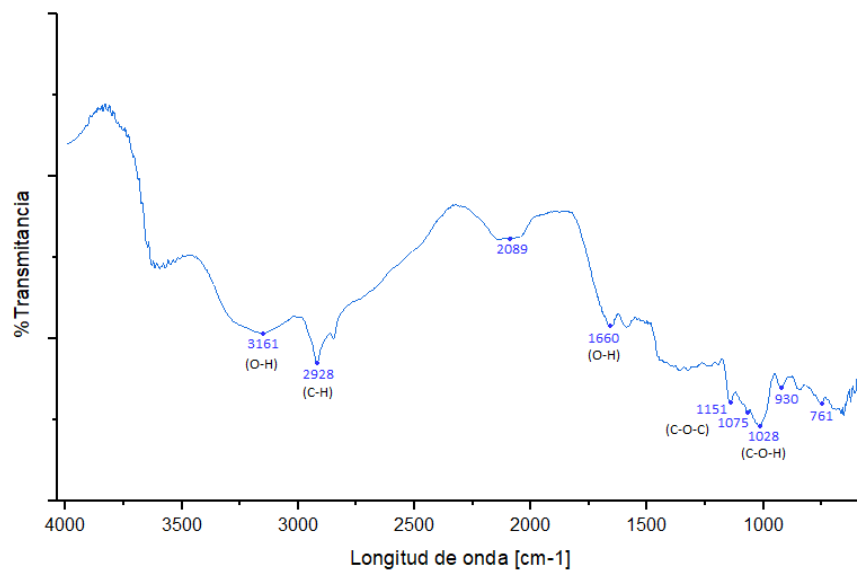


Figura 23. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica e hidrólisis ácida.

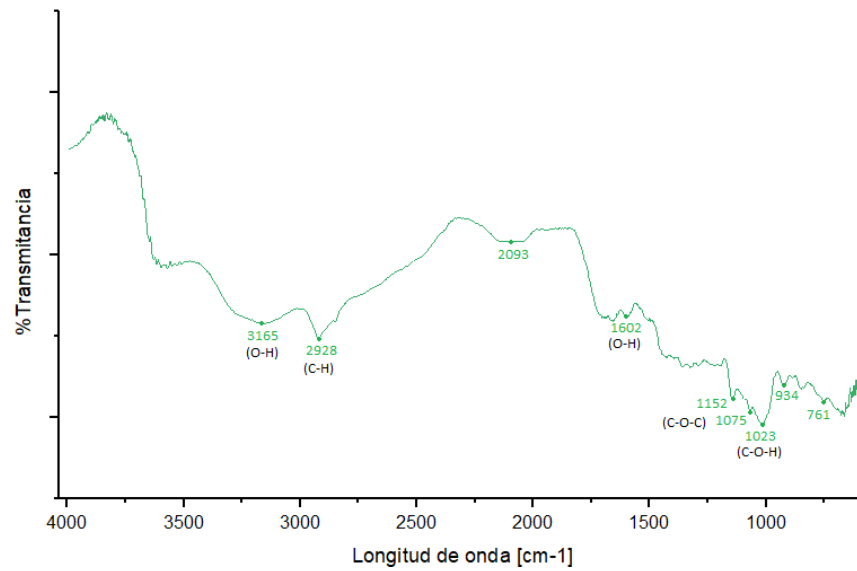


Figura 24. FTIR celulosa extraída de la semilla con digestión básica, hidrólisis ácida y blanqueo.

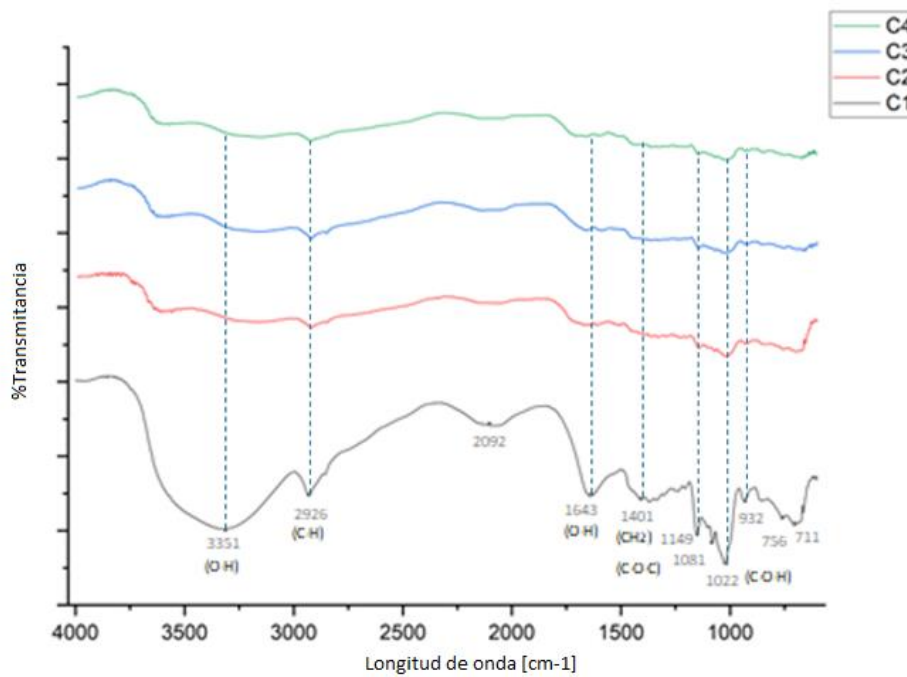


Figura 25. Comparación resultados de FTIR para la celulosa extraída de la semilla. Celulosa con tratamiento básico (C1), celulosa con tratamiento básico y blanqueo (C2), celulosa con tratamiento básico e hidrólisis ácida (C3), celulosa con tratamiento básico, hidrólisis ácida y blanqueo (C4).

En el caso de la extracción de la celulosa de las cáscaras se realizó únicamente el tratamiento básico con NaOH y el espectro obtenido (Figura 26) muestra igualmente las bandas características para la estructura de la celulosa.

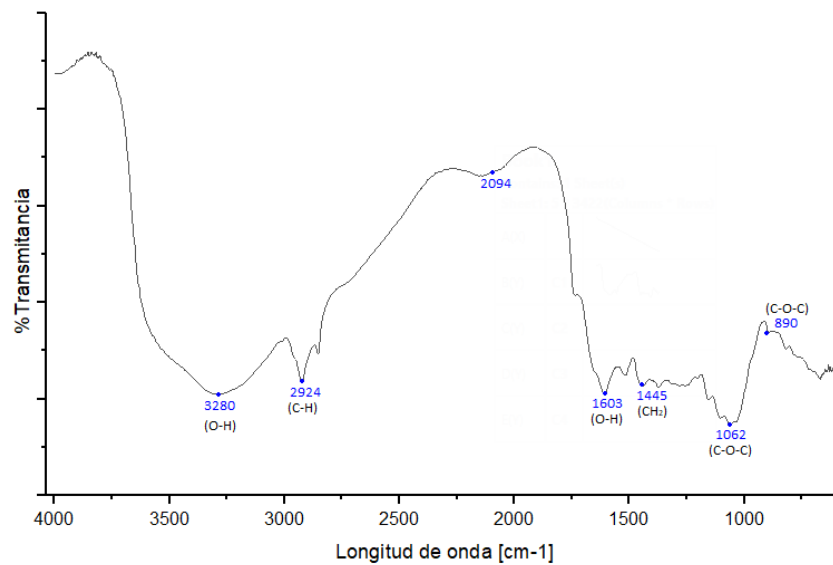


Figura 26. FTIR celulosa extraída de la cáscara con digestión básica.

*c) Biopelículas*

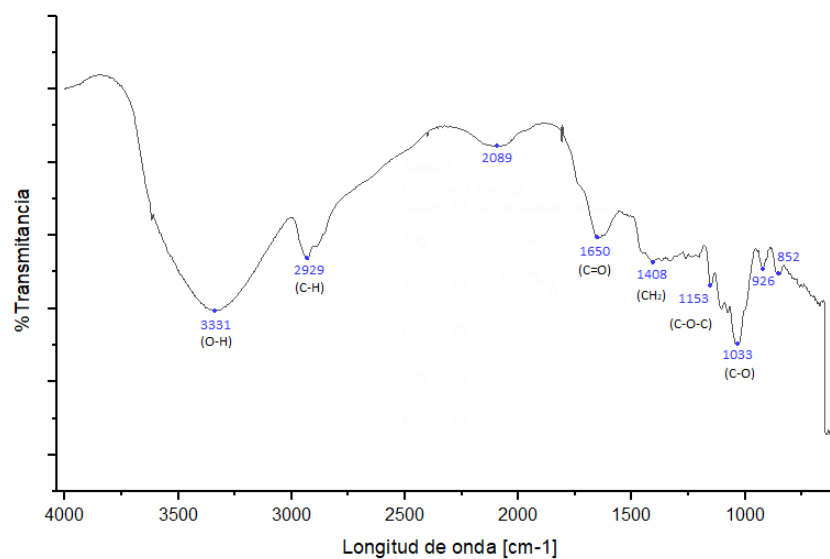


Figura 27. FTIR biopelícula con almidón y celulosa extraída de la cáscara (composición BB).

En la Figura 27 se identifica la banda alrededor de  $3331\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a los grupos hidroxilos presente en el almidón, la celulosa, el glicerol y el ácido acético, la banda en  $2929\text{ cm}^{-1}$  de las vibraciones de tensión de los enlaces C-H y en  $1650\text{ cm}^{-1}$  el pico característico del estiramiento C=O del grupo carbonilo del ácido acético [44]. La banda en  $1153\text{ cm}^{-1}$  corresponde a los estiramientos de los enlaces glucosídicos C-O-C que están presentes tanto en el almidón como en la celulosa, así como las vibraciones asociadas a los enlaces C-O registrados en la banda de

1033  $\text{cm}^{-1}$ . En la zona menor a los 1000  $\text{cm}^{-1}$  se registran las mismas bandas correspondientes al anillo de la piranosa encontrados en el FTIR del almidón [40].

2) *Prueba de yodo*: Para la prueba del yodo se hizo uso de Lugol, una disolución de yodo y yoduro de potasio. Se realizó en pequeñas muestras del almidón extraído por los diferentes métodos: Extracción por método húmedo en medio neutro (H), método seco (S), almidón extraído con mayor porcentaje de rendimiento que corresponde a una muestra de extracción en seco (O); y a una muestra de las semillas trituradas sin extracción (M). En la Figura 30 se observa que todas las muestras se tiñen de un color morado oscuro inmediatamente al tener contacto con el Lugol, esto indica que la prueba es positiva y se tiene la presencia del almidón.

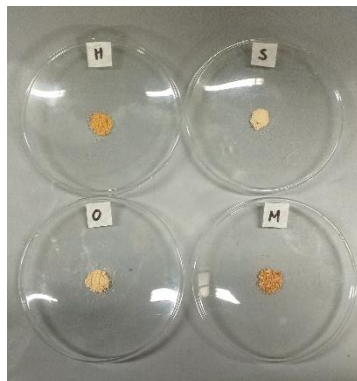


Figura 28. Muestras de almidón extraído por método húmedo (H) y seco (S y O) y materia prima (M).

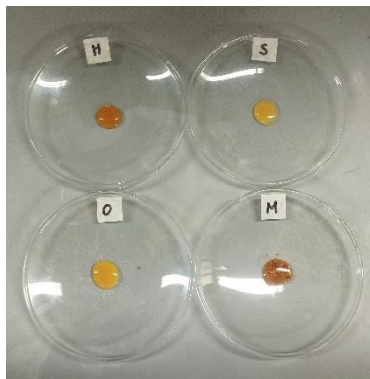


Figura 29. Muestras de almidón H, S, O y materia prima en suspensión acuosa.

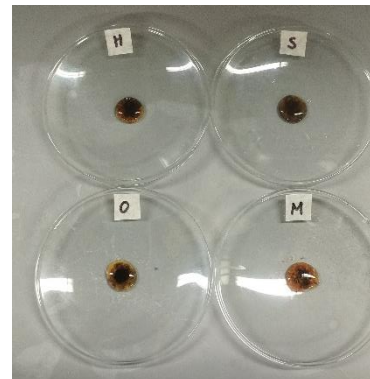


Figura 30. Prueba de Lugol en cada muestra de almidón extraído por método húmedo (H) y seco (S y O) y materia prima (M).

3) *DSC*: Como se observa en la Figura 31 se presenta un leve pico endotérmico correspondiente a la gelatinización del almidón en un rango de temperatura relativamente estrecho desde 63.62 a 72.55  $^{\circ}\text{C}$  y una entalpía de gelatinización de 4.07 J/g, lo cual no difiere significativamente a los datos reportados para almidones nativos los cuales presentan una temperatura de gelatinización

entre una temperatura de 60 y 75 °C además de una entalpía de gelatinización en un rango de 5-20 J/g [45] y que son dependientes del porcentaje de humedad en la que se analice la muestra, esto porque la disponibilidad de agua para el proceso de hinchamiento de los gránulos de almidón se puede ver limitada y por tanto no darse el proceso de gelatinización de toda la muestra.

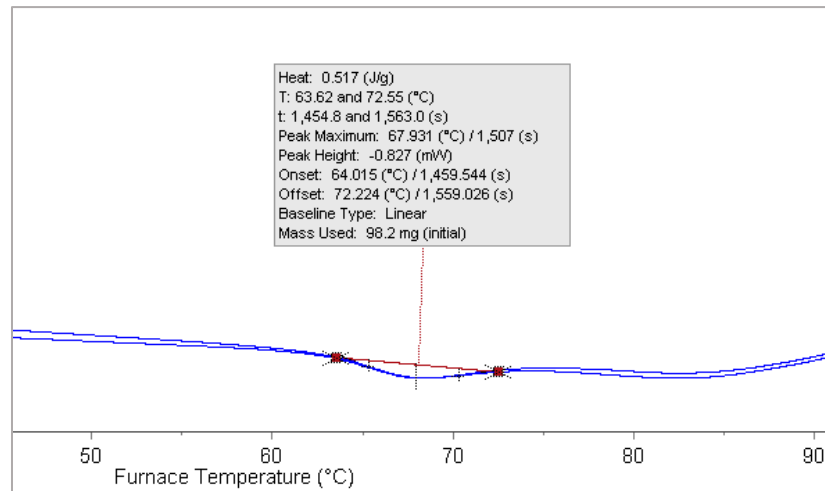


Figura 31. DSC realizado en el almidón extraído.

4) *TGA*: En todas las muestras analizadas tanto de la materia prima (cáscara y semilla del aguacate) como de la celulosa extraída se tiene una pérdida de aproximadamente el 10% de la masa total de la muestra correspondiente a la evaporación del agua retenida en las muestras. En las cáscaras, la mayor pérdida de masa se da en un rango de temperatura de 150°C a 300°C dentro del cual ocurre la descomposición de pectinas y parte de compuestos orgánicos como celulosa y hemicelulosa [46], en el rango de 300-400°C se descompone la celulosa residual y posteriormente hasta los 475°C se da la descomposición de la lignina. Como se observa en la Figura 32 queda aproximadamente un 5% de masa residual, la cual corresponde a la cantidad de cenizas presentes en la muestra [47].

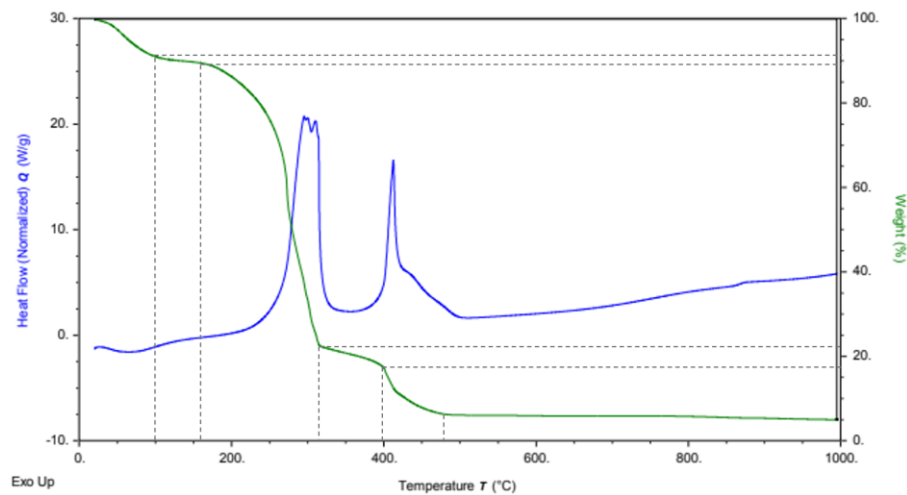


Figura 32. TGA de las cáscaras de aguacate Hass.

En el caso de las semillas (Figura 33) se tiene la descomposición de las pectinas y compuestos orgánicos como la hemicelulosa en un rango de temperatura de 240°C a 325°C correspondientes al 60% de la masa total de la muestra, posteriormente hasta los 400°C se da la descomposición de la celulosa [46] y finalmente la descomposición de la lignina que se da hasta aproximadamente 475°C.

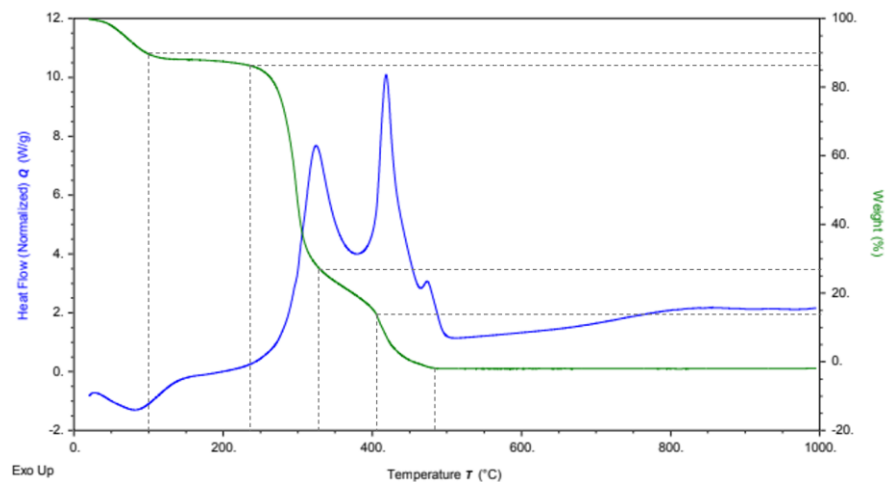


Figura 33. TGA de las semillas del aguacate Hass.

Para la muestra de celulosa extraída de las cáscaras (Figura 34), el contenido de hemicelulosa es alto, el compuesto orgánico que se descompone en el rango de 200-350°C corresponde aproximadamente al 80% de la muestra; posteriormente, se presenta la descomposición de la celulosa hasta una temperatura de 475°C [46]. En la muestra de la celulosa extraída de las semillas,

Figura 35, se presenta una cantidad de hemicelulosa menor (50%) pero se tiene un comportamiento similar al de la celulosa extraída de las cáscaras.

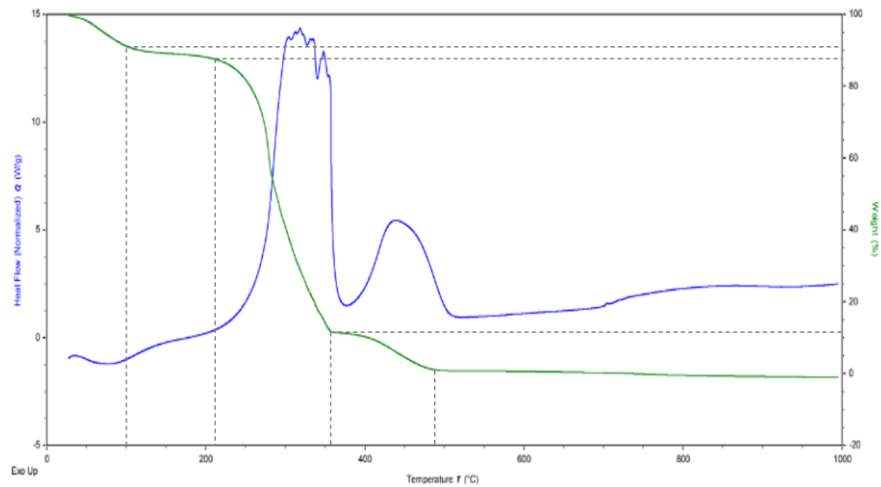


Figura 34. TGA de la celulosa extraída de las cáscaras del aguacate Hass.

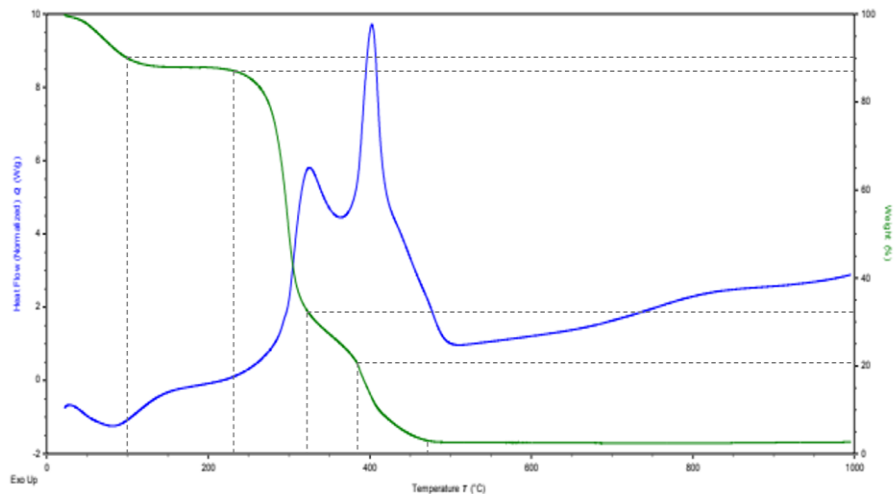


Figura 35. TGA de la celulosa extraída de las semillas del aguacate Hass.

5) *SEM*: En la Figura 36 se observa la superficie de algunas biopelículas obtenidas (A3, BA3, BB3) en las cuales se presentan algunas grietas y ciertos desniveles que corresponden a posibles aglomeraciones de la solución filmogénica al momento de secarse, lo cual también se observa mayormente en las biopelículas con celulosa ya que como se indicó después del proceso de secado se observan algunas partículas de celulosa en la película.

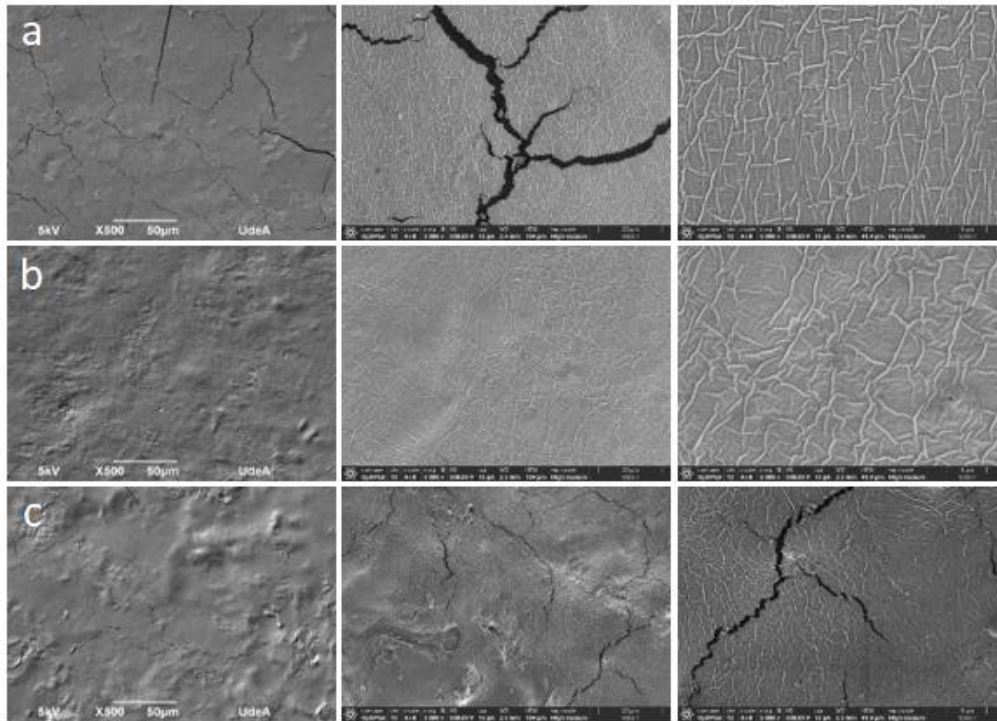


Figura 36. SEM de las biopelículas obtenidas en 500X, 2000X y 5000X para la composición A3 (a), composición BA3 (b) y composición BB3 (c).

6) Pruebas adicionales

a) Porcentaje de humedad

TABLA XI. PORCENTAJE DE HUMEDAD BIOPELÍCULAS CON COMPOSICIÓN A.

Formulación	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Humedad [%]
A1	0.0391	0.0260	33.5
A2	0.0513	0.0386	24.8
A3	0.0437	0.0341	22.0
A4	0.0229	0.0183	20.1
A5	0.0413	0.0333	19.4

TABLA XII. PORCENTAJE DE HUMEDAD BIOPELÍCULAS CON COMPOSICIÓN BA.

Formulación	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Humedad [%]
BA1	0.1329	0.0986	25.8
BA2	0.1057	0.0927	12.3
BA3	0.0984	0.0781	20.6
BA4	0.0316	0.0200	36.7
BA5	0.0431	0.0265	38.5

TABLA XIII. PORCENTAJE DE HUMEDAD BIOPELÍCULAS CON COMPOSICIÓN BB.

Formulación	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Humedad [%]
BB1	0.0648	0.0512	21.0
BB2	0.0731	0.0672	8.1
BB3	0.1029	0.0798	22.4
BB4	0.0331	0.0225	32.0
BB5	0.0806	0.0589	26.9

*b) Porcentaje de solubilidad*

**TABLA XIV. PORCENTAJE DE SOLUBILIDAD BIOPELÍCULAS COMPOSICIÓN A.**

Formulación	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Solubilidad [%]
A1	0.0260	0.0178	31.5
A2	0.0386	0.0263	31.9
A3	0.0341	0.0264	22.6
A4	0.0183	0.0170	7.1
A5	0.0333	0.0308	7.5

**TABLA XV. PORCENTAJE DE SOLUBILIDAD BIOPELÍCULAS COMPOSICIÓN BA.**

Formulación	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Solubilidad [%]
BA1	0.0986	0.0751	23.8
BA2	0.0927	0.0909	1.9
BA3	0.0781	0.0557	28.7
BA4	0.0200	0.0164	17.8
BA5	0.0265	0.0210	20.8

**TABLA XVI. PORCENTAJE DE SOLUBILIDAD BIOPELÍCULAS COMPOSICIÓN BB.**

Formulación	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Solubilidad [%]
BB1	0.0512	0.0380	25.7
BB2	0.0672	0.0645	4.0
BB3	0.0798	0.0519	35.0
BB4	0.0225	0.0196	12.8
BB5	0.0589	0.0454	22.9

## IX. DISCUSIÓN

### A. Adecuación de la materia prima

Se encuentra que para las cáscaras y semillas el porcentaje de humedad encontrado al dejar secar la materia prima a temperatura ambiente y siguiendo la norma AOAC son similares, con la diferencia que al realizarlo a condiciones ambientales se expone a un mayor deterioro de la materia orgánica presente por la propagación de hongos. En el caso de las cáscaras, este crecimiento microbiano se ve favorecido por su alto contenido de humedad lo cual crea un entorno en el que los microorganismos pueden propagarse fácilmente al proporcionarles el agua necesaria para sus procesos biológicos [48].

### B. Extracción de almidón

El cambio en la coloración de las semillas del aguacate una vez se presenta el proceso de rallado (Figura 13) se da por la oxidación del catecol o pirocatecol, un polifenol presente en el aguacate el cual en presencia de oxígeno reacciona para convertirse en 1,2-benzoquinona; esta reacción es catalizada por la enzima polifenol oxidasa que igualmente está presente en la materia orgánica. La 1,2-benzoquinona se polimeriza obteniendo largas cadenas de polifenoles y se convierte en un precursor de la melanina la cual confiere una coloración más oscura [49].

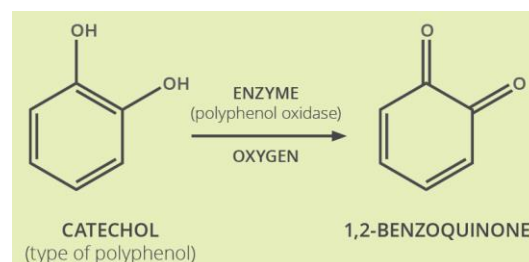


Figura 37. Reacción de oxidación del catecol [49].

Para el almidón extraído por método seco en el cual se analizó el efecto del tamaño de partícula, se obtiene un rendimiento mayor cuando solo se realiza una trituración y el tamaño de partícula de las semillas del aguacate están mayormente en un rango superior a los 425  $\mu\text{m}$ , esto debido a que la sedimentación que es un proceso mecánico para separaciones sólido-líquido, se ve afectada por diversos factores como la temperatura, presión, tamaños de partícula y fuerza externa imprimida para la separación. Durante el experimento se aseguraron iguales condiciones en cuanto a temperatura, presión y el tipo de fuerza externa (gravitacional) a la que fueron sometidas; por tanto, la única variable considerada es el tamaño de partícula. Si bien la sedimentación consta de 2 etapas

en donde inicialmente la suspensión homogénea con una determinada concentración inicial comienza a sedimentarse a una velocidad constante y posteriormente las partículas sólidas comienzan a comprimirse desplazando el líquido existente hacia la superficie y la velocidad deja de ser constante, dicha velocidad depende directamente del tamaño de partícula como se indica en la Figura 38 y la ecuación (4) [50].

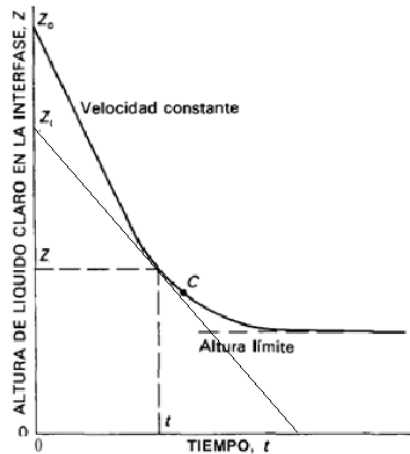


Figura 38. Etapas de la sedimentación [51].

$$Vg = \frac{d^2(\Delta\rho)g}{18\eta} \quad (4)$$

Como el tiempo de sedimentación para los dos experimentos fue el mismo pero la velocidad de la sedimentación en cada uno fue diferente, se entiende que en el caso en que se tienen menores tamaños de partícula el tiempo de sedimentación debe ser mayor. Además, que en la mezcla se presenta una suspensión de tipo coloidal en donde las partículas son lo suficientemente pequeñas; por tanto, la fase dispersa se mantiene suspendida y la fuerza externa imprimida no alcanza a generar la separación de las fases [52].

Cuando se da la extracción por método húmedo con el uso del bisulfito de sodio se identifica que la solución obtenida no posee el color característico en los otros experimentos si no que tiene una tonalidad amarilla, esto debido a que la presencia de esta solución salina inhibe el pardeamiento enzimático inducido por la enzima polifenol oxidasa de las semillas del aguacate al aumentar el pH de la solución y alejarlo del pH óptimo de la enzima oxidante el cual se encuentra ente 5.0 y 7.0

[53]. Sin embargo, este proceso no impacta directamente en la composición y la extracción del almidón, por lo cual se tienen rendimientos similares en ambos casos.

### *C. Extracción de celulosa*

1) *Semillas*: Al realizar el proceso de la digestión de lignina con el NaOH se obtiene una solución viscosa con una coloración vinotinto oscuro, esto debido a que la lignina presente se descompone en diferentes productos fenólicos los cuales presentan dicha coloración [54]. Cuando se realiza la hidrólisis ácida, los enlaces glucosídicos de la celulosa se rompen descomponiéndola en sus monosacáridos constituyentes, por tanto, pierde estructura. Como etapa final se realizó el blanqueo en donde se busca eliminar los grupos cromóforos los cuales son los responsables de darle la coloración a la celulosa; sin embargo, durante este proceso no se observan cambios significativos en la coloración debido a que el tratamiento con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no fue lo suficientemente agresivo para eliminar los grupos cromóforos dado que se utilizó una concentración baja del reactivo. Por esto, se decide realizar únicamente el procedimiento de digestión básica para la extracción de la celulosa tanto en la semilla como en la cáscara.

2) *Cáscaras*: Después de la digestión básica se obtiene una solución más grumosa que la obtenida con las semillas, esto puede deberse a diferentes características de la materia prima como el tamaño de partícula, la concentración de lignina o de la estructura de esta.

### *D. Biopelículas*

1) *Composición A*: Las biopelículas obtenidas no difieren significativamente a nivel visual, sin embargo, si se logra apreciar pequeños cambios al desmoldar ya que al aumentar la cantidad de almidón la película quedaba un poco más rígida y por tanto se separaba del molde más fácilmente. En todas las películas se logra apreciar un lado brillante ligeramente pegajoso y otro opaco; el lado brillante corresponde al lado que está en contacto directo con el molde por lo que esta apariencia se obtiene al no tener exposición directa con el aire durante el secado, la uniformidad del molde le da esa apariencia lisa y una mayor retención de humedad en esta zona de la película.

2) *Composición B*: Se tiene un caso similar a la composición A, en la que a medida que aumenta la cantidad de mezcla almidón-celulosa la película es más rígida. La celulosa le da a la película un color más oscuro y visiblemente se observan partículas de esta, esto debido a que la celulosa es insoluble en agua por lo que no se disuelve; sin embargo, estas partículas se incorporan en la solución viscosa que forma el almidón como un refuerzo estructural y al ser un biopolímero con

una estructura rígida le brinda a la película mayor rigidez en comparación a las que solo contienen el almidón.

3) *Composición C*: En este caso no se obtiene una solución filmogénica para la formación de las biopelículas porque la celulosa no es soluble en agua lo cual es importante para asegurar la adherencia tanto de este componente como de los demás reactivos utilizados (glicerol y ácido acético). Por tanto, se forma una suspensión y no una solución a diferencia de cuando se utiliza la mezcla de celulosa con almidón porque el almidón al gelatinizarse atrapa la celulosa y da la estructura a la película.

### E. Caracterizaciones

1) *FTIR*: Los espectros obtenidos para el almidón y la celulosa no difieren significativamente debido a la similitud estructural de las moléculas. Como se observa en la Figura 39 y Figura 40 ambas estructuras están compuestas por el mismo tipo de unidades monoméricas (glucosa), por lo cual la diferencia radica principalmente en la orientación de dichos monómeros; en el almidón todos están orientados en la misma dirección mientras que en la celulosa estos rotan alrededor del eje de la cadena polimérica.

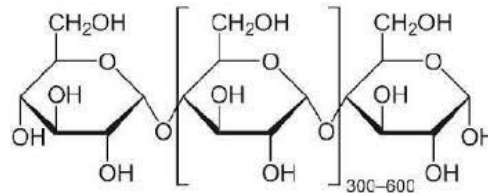


Figura 39. Estructura del almidón [55].

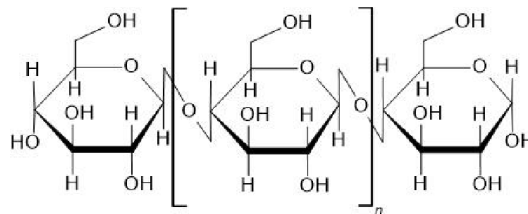


Figura 40. Estructura de la celulosa [56].

En el caso del FTIR de la biopelícula obtenida se logran identificar bandas características de los compuestos con los que se realizó por lo cual se infiere que estos no sufren cambios estructurales significativos; sin embargo, si se identifica un desplazamiento en la banda característica del C=O del ácido acético que se puede deber a su interacción de esterificación con el glicerol.

2) *Yodo*: El cambio en la coloración en las muestras de almidón se produce porque el yodo se introduce entre las espiras (estructura espiral de la amilosa) de la molécula y se da la formación de cadenas de poliyoduro que se enlazan con las hélices del almidón lo cual modifica las propiedades físicas de esta, apareciendo la coloración morada. La unión del yodo a la cadena es un proceso reversible que se da al calentar la muestra y así el color desaparece [57].

3) *DSC*: Con este análisis se permite determinar la temperatura de transición de gelatinización para el almidón el cual corresponde a un proceso en donde las moléculas vibran y se da el rompimiento de los enlaces de hidrógeno lo que provoca el hinchamiento por la absorción de agua. Esto es importante para conocer la temperatura en la cual se debe realizar la formación de las biopelículas para asegurar que el almidón se gelatinice y así le dé la consistencia de una pasta viscosa a la solución filmogénica, lo cual se garantiza dentro de la formación de las biopelículas al tener una temperatura de 85°C.

4) *TGA*: Dentro de las muestras analizadas se tiene un comportamiento térmico consistente, esto debido a que en cada caso se observa la descomposición de los principales compuestos orgánicos como la hemicelulosa y la celulosa, en el mismo rango de temperatura, aunque en proporciones diferentes, esto como resultado de su composición. Esto sugiere que tanto la materia prima (cáscaras y semillas) como la celulosa extraída de cada una, presentan características térmicas similares y confirma la presencia de estos compuestos en cada una de las muestras.

5) *SEM*: Como se observa en las imágenes obtenidas para las biopelículas (Figura 32) presentan grietas que pueden deberse al proceso de secado en donde la solución no se dispersa de forma homogénea y por tanto parte de la película quedan con porcentajes menores de humedad, lo cual causa una mayor rigidez y tendencia a fracturarse. Además de la manipulación al momento de desmoldarlas ya que el lado que está en contacto directo con el molde se tiende a adherir.

6) *Pruebas adicionales:*

a) *Porcentaje de humedad*: Para las composiciones A, como se observa en la Tabla XI se tiene que el porcentaje de humedad en las películas disminuye una vez se aumenta la cantidad de almidón, esto porque al generarse el proceso de gelatinización se forma una red más densa y estable, y por tanto una mayor cantidad de agua queda libre y se elimina durante el proceso de secado [45]. Para las composiciones BA y BB, Tabla XII y Tabla XIII, se tiene el mismo comportamiento, esto porque en la mezcla se tiene la presencia de almidón el cual es el que absorbe el agua.

---

*b) Porcentaje de solubilidad:* Se tiene un comportamiento similar al porcentaje de humedad en donde al aumentar la cantidad de la mezcla almidón-celulosa la red estructural formada en la película es más densa y por tanto esta se vuelve más rígida y menos soluble. Para la composición A, Tabla XIV, se observa la disminución gradual en este porcentaje medida que se aumenta el almidón, mientras que en las composiciones BA y BB, Tabla XV y XVI respectivamente, se distingue únicamente cuando se evalúan los extremos.

*F. Diagramas de bloques, especificación de corrientes y consumo energético del proceso.*

Para los procesos de trituración tanto de las semillas como de las cáscaras se hizo uso de un molino eléctrico marca Electric Grinder, modelo MOE005002-CM157; una plancha Heidolph tipo MR Hei-standard con agitador magnético, empleada para la agitación, la digestión de lignina y el calentamiento en la formación de las biopelículas; una centrífuga Hettich Zentrifugen, modelo Rotofix 32, para realizar la centrifugación del almidón y un horno de convección mecánica Lindeberg Blue, modelo M01420A-1 para todas las operaciones de secado.

*1) Diagramas de bloques*

*a) Extracción del almidón*

En el proceso de extracción del almidón se hizo uso de diferentes operaciones unitarias, como se observa en la Figura 41. Cada una de las corrientes del proceso se encuentra especificada en la Tabla XVII.

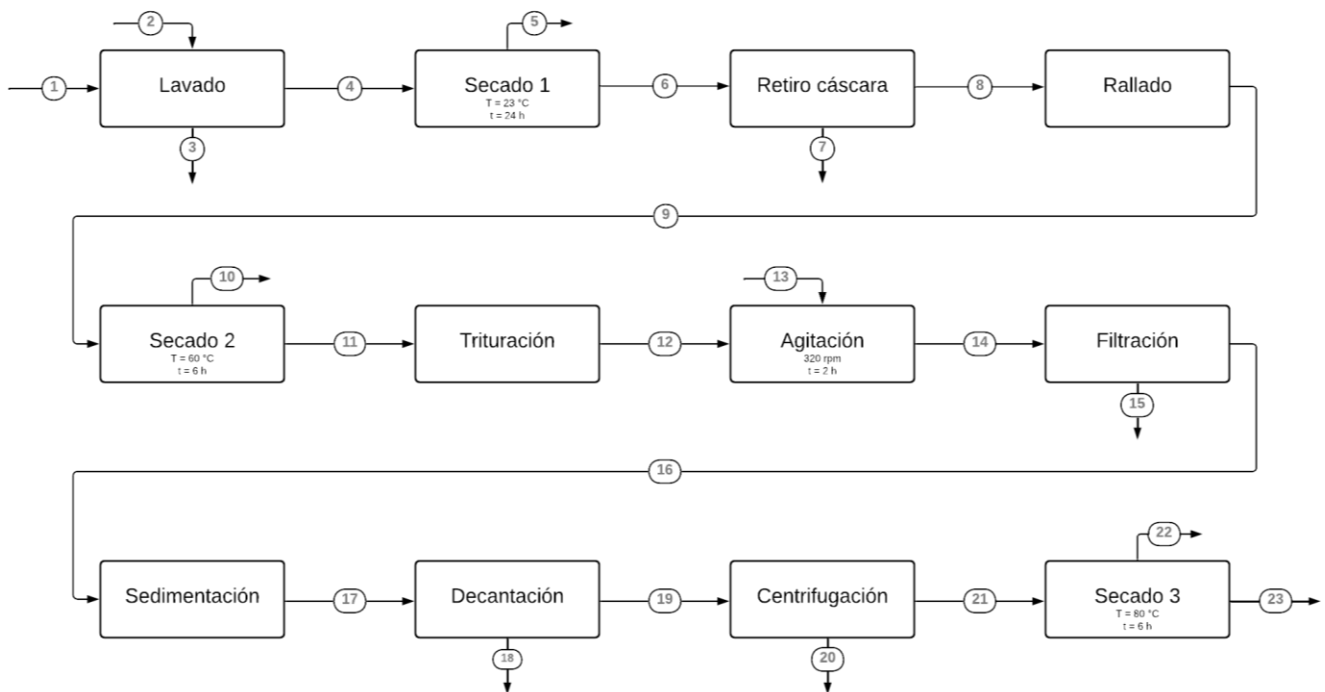


Figura 41. Diagrama de bloques para el proceso de extracción de almidón.

TABLA XVII: LISTA DE CORRIENTES PARA EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN.

Número	Descripción
1	Semillas con residuos de pulpa de aguacate
2	Agua
3	Agua con residuos de pulpa
4	Semillas con cáscara húmedas
5	Vapor de agua
6	Semillas con cáscara con porcentaje menor de humedad
7	Cáscaras de semillas
8	Semillas húmedas enteras
9	Semillas húmedas ralladas
10	Vapor de agua
11	Semillas ralladas secas
12	Semillas trituradas secas
13	Agua
14	Suspensión agua-semillas
15	Residuos sólidos húmedos de filtración para extracción de celulosa
16	Agua residual con almidón
17	Agua y almidón sedimentado
18	Agua residual de la decantación
19	Almidón con agua residual
20	Agua residual
21	Almidón húmedo
22	Vapor de agua
23	Almidón seco

*b) Extracción celulosa de la semilla: Proceso en serie con la extracción de almidón.*

La extracción de celulosa de la semilla se realiza con los residuos sólidos que se generan en la extracción de almidón, y se realizan diferentes operaciones tal como se observa en la Figura 42. En la Tabla XVIII se identifican las corrientes; al ser un proceso en serie con la extracción del almidón, la numeración de las corrientes va acorde a las especificadas en la Tabla XVII.

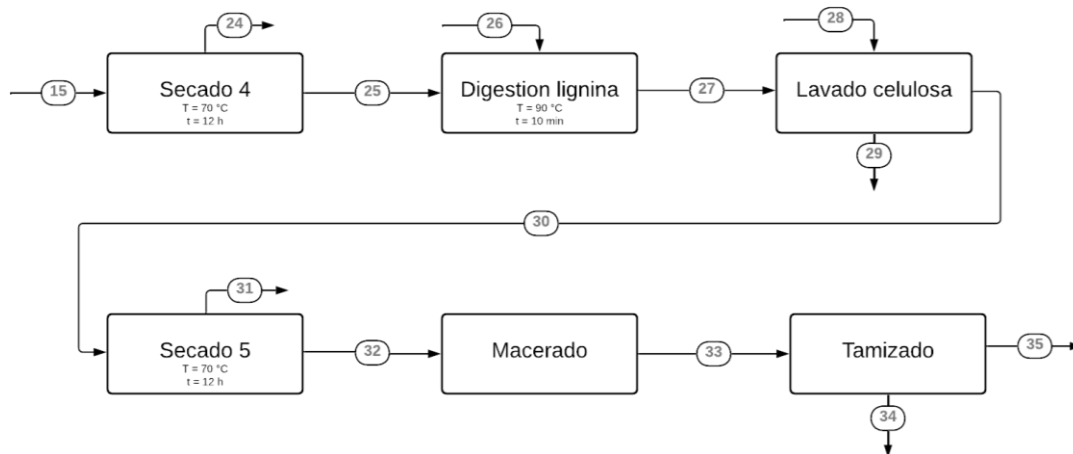


Figura 42. Diagrama de bloques para el proceso de extracción de celulosa de las semillas de aguacate.

TABLA XVIII: LISTA DE CORRIENTES PARA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LA SEMILLA.

Número	Descripción
15	Residuos sólidos húmedos de filtración de la extracción de celulosa
24	Vapor de agua
25	Residuos sólidos secos de la semilla
26	NaOH al 1%
27	Solución con celulosa y residuos
28	Agua
29	Agua residual con lignina
30	Celulosa húmeda
31	Vapor de agua
32	Celulosa seca
33	Celulosa seca macerada
34	Residuos celulosa seca
35	Celulosa tamizada

*c) Extracción celulosa de la cáscara*

La extracción de celulosa de las cáscaras se realiza con la misma metodología que en las semillas, pero se cuenta con más operaciones unitarias (Figura 43) porque se realiza la adecuación de la materia prima.

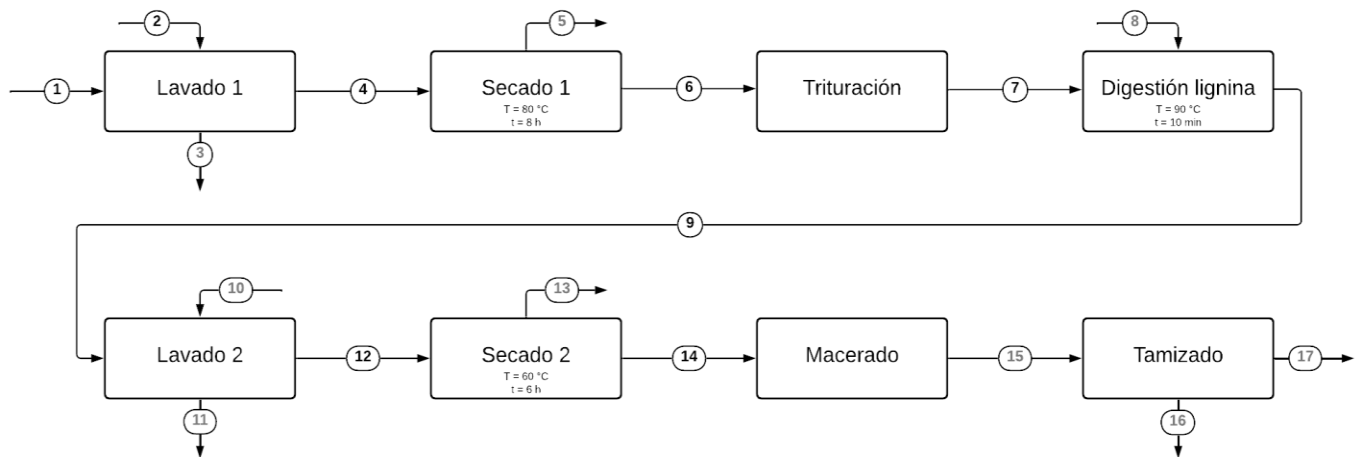


Figura 43. Diagrama de bloques para el proceso de extracción de celulosa de las cáscaras de aguacate.

TABLA XIX: LISTA DE CORRIENTES PARA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LAS CÁSCARAS.

Número	Descripción
1	Cáscaras con residuos de pulpa de aguacate
2	Agua
3	Agua con residuos de pulpa
4	Cáscaras húmedas
5	Vapor de agua
6	Cáscaras secas
7	Cáscaras secas trituradas
8	NaOH al 1%
9	Solución con celulosa y residuos
10	Agua
11	Agua residual con lignina
12	Celulosa húmeda
13	Vapor de agua
14	Celulosa seca
15	Celulosa seca macerada
16	Residuos celulosa seca
17	Celulosa tamizada

*d) Formación de biopelículas*

En la Figura 44, se muestran las etapas que se realizan para la formación de las biopelículas, así como la identificación de cada una de las corrientes (Tabla XX).





<b>Agua + Residuos con lignina [g]</b>	-	-	-	-	5227.41	-	53451.76	-	-	-	-	-	-
<b>Celulosa [g]</b>	-	-	-	-	420.52	-		420,52	-	420,52	416,36	66,62	349,74
<b>TOTAL</b>	2327.98	1344.78	982.90	4914.51	5647.93	49145	53451.76	1341,17	920,65	420,52	416,36	66,62	349,74

El consumo energético se calculó en función a la cantidad de materia prima tratada y el tiempo de proceso; solo se especifica para las operaciones en donde se utilizan equipos con consumo energético.

TABLA XXIV: CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LA SEMILLA.

Operación	Tiempo [h]	Potencia [kW]	kWh
<b>Secado 4</b>	12	1	12
<b>Digestión lignina</b>	0.17	0.62	0.103
<b>Secado 5</b>	12	1	12
<b>Consumo energético total [kWh]</b>			<b>24.103</b>

*c) Extracción de celulosa de la cáscara*

En la extracción de celulosa de la cáscara se realiza el seguimiento de la masa de cada componente en las corrientes del proceso, se tienen en cuenta las entradas y salidas a cada operación y algunas pérdidas de masa en los equipos y la cantidad total de celulosa extraída.

TABLA XXV: ESPECIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LAS SEMILLAS DE AGUACATE.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Cáscaras</b>	553.51	-	-	553.51	-	553.51	546.31	546.31	-	-
<b>Agua</b>	1938.04	2000	1515.49	2422.55	2422.55	-	-	-	-	8495.19
<b>Pulpa de aguacate</b>	110.702	-	110.702	-	-	-	-	-	-	-
<b>NaOH al 1%</b>	-	-	-	-	-	-	-	2185.26	-	-
<b>Agua + Residuos con lignina</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	2801.57	-
<b>Celulosa</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	339.81	-
<b>TOTAL</b>	2602.252	2000	1626.192	2976.06	2422.55	553.51	546.31	2731.57	3141.38	8495.19

TABLA XXV (continuación): ESPECIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LAS SEMILLAS DE AGUACATE.

	11	12	13	14	15	16	17
<b>Cáscaras</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Agua</b>	-	2388.80	2388.80	-	-	-	-
<b>Pulpa de aguacate</b>	-	-	-	-	-	-	-

<b>NaOH al 1%</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Agua + Residuos con lignina</b>	8907.96	-	-	-	-	-	-
<b>Celulosa</b>	-	339.81	-	339.81	339.04	47.47	291.58
<b>TOTAL</b>	8907.96	2728.61	2388.80	339.81	339.04	47.47	291.58

El consumo energético se calculó en función a la cantidad de materia prima tratada y el tiempo de proceso; solo se especifica para las operaciones en donde se utilizan equipos con consumo energético.

TABLA XXVI: CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EXTRACCIÓN DE CELULOSA DE LA CÁSCARA.

<b>Operación</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Potencia [kW]</b>	<b>kWh</b>
Secado 1	8	1	8
Digestión Lignina	0.17	0.62	0.103
Secado 2	8	1	8
<b>Consumo energético total [kWh]</b>			<b>16.103</b>

*d) Formación de biopelículas*

Para las películas no se realizó la especificación de la masa de los compuestos por corriente porque estas dependen de la composición con la que se realiza cada una, igualmente se realiza el cálculo del consumo energético promedio para la formación de una biopelícula.

TABLA XXVII: CONSUMO ENERGÉTICO PROMEDIO EN LA FORMACIÓN DE UNA BIOPELÍCULA.

<b>Operación</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Potencia [kW]</b>	<b>kWh</b>
<b>Gelatinización almidón</b>	0.5	0.62	0.31
<b>Calentamiento</b>	0.17	0.62	0.103
<b>Consumo energético total [kWh]</b>			<b>0.413</b>

---

## X. CONCLUSIONES

De acuerdo con los procedimientos realizados se encontró que para la extracción de almidón se puede hacer uso de diferentes métodos dentro de los cuales es importante tener en cuenta factores como el tamaño de partícula o el medio extractor para maximizar el rendimiento de la extracción, en el proceso realizado por método seco se identificó que el tamaño de partícula es importante para definir el tiempo de sedimentación ya que se obtuvo una mayor cantidad de almidón con mayores tamaños de partícula ( $> 425 \mu\text{m}$ ) en un tiempo de 24 h. Con el método húmedo se identifica la importancia del medio extractor para asegurar la solubilidad del almidón o prevenir reacciones indeseadas que pueda sufrir la materia prima como la oxidación, bajo las condiciones en que se realizó la extracción el medio extractor óptimo encontrado fue el agua.

En la extracción de la celulosa la digestión básica con NaOH es un paso fundamental para la eliminación de la lignina y hemicelulosa de la materia prima, además que para las semillas y las cáscaras de aguacate no es necesario implementar otros métodos como la hidrólisis ácida y el blanqueo, ya que descomponen la estructura de la celulosa obtenida, comprometiendo la integridad de la celulosa. Al utilizar una baja concentración de NaOH para la digestión de la lignina no se logra descomponer o disolver la totalidad de la hemicelulosa y la lignina de las muestras, lo cual se observa en el TGA, por lo cual se podría aumentar la concentración de la base para el proceso y así lograr obtener celulosa más pura.

Las biopelículas formadas con el almidón y celulosa extraídos del aguacate mostraron variaciones significativas en sus propiedades según la composición utilizada. Estos resultados indican que la combinación y proporción de almidón y celulosa impactan las características físicas de las biopelículas, como su rigidez, color y solubilidad. En el caso particular de las composiciones analizadas se obtiene que las películas con mejores características físicas son las de la composición BA, con un contenido de 0.1 g de celulosa, 0.1 g de almidón, 0.25 g de glicerol, 10 g de ácido acético al 5% y 20 g de agua, esto porque tienen buena apariencia, son uniformes, presentan un menor agrietamiento y al tacto son consistentes en rigidez y elasticidad.

El uso de diferentes técnicas de caracterización como el FTIR permitieron analizar e identificar la presencia de los compuestos extraídos, así como algunas variaciones obtenidas en la estructura de los reactivos utilizados para la formación de las biopelículas; sin embargo, se encontraron espectros con bandas similares al tener compuestos con los mismos grupos funcionales. Con SEM se observó la superficie y algunos defectos en las películas obtenidas que no se identifican a simple

vista, lo cual es un factor importante para implementar posibles mejoras en el proceso de moldeo o en la formulación de la solución filmogénica.

Con la descripción de las corrientes de cada uno de los procesos implementados se obtiene información importante para realizar el seguimiento de los compuestos que se tienen o se generan durante cada operación; además de hacer posible la identificación de posibles pérdidas por el uso de equipos en procesos como la trituración o el macerado. Con el cálculo del consumo energético del proceso se resalta la eficiencia de este y su relación entre las entradas de masa y el uso de energía, como se logró observar, el consumo energético de cada proceso es relativamente bajo principalmente debido a que la mayoría de las operaciones se realizan de forma manual.

Con este proyecto se logra reconocer la valorización que se puede implementar en los subproductos de aguacate Hass y se expone una estrategia efectiva para promover la sostenibilidad y reducir los residuos agrícolas. Este enfoque no solo contribuye al aprovechamiento de recursos subutilizados, sino que también abre oportunidades para el desarrollo de materiales ecológicos.

## XI. RECOMENDACIONES

En todos los procesos de secado del material extraído final (almidón o celulosa) se debe remover el sólido húmedo para lograr un secado homogéneo, evitando que quede humedad en el fondo.

Como se trabaja con material orgánico, siempre que se vaya a almacenar se debe asegurar que esté completamente seco.

Para la formación de las biopelículas al momento de gelatinizar el almidón se debe mantener agitación constante para evitar la formación de grumos y una vez la solución se reduce, se debe agregar el glicerol y el ácido acético. Para controlar la viscosidad de la mezcla es mejor realizar agitación manual, además que en la superficie la solución tiende a plastificarse rápidamente y es necesario asegurar que no se forme esa capa superficial.

El moldeo de las biopelículas se realiza con la solución caliente para evitar que empiece a secarse y para permitir que se desplace uniformemente.

El secado de las películas no se realiza en horno porque los flujos de aire tienden a mover la solución filmogénica lo que ocasiona que la película quede con zonas “dobladas” o aglomeradas.

---

## REFERENCIAS

- [1] Minagricultura, «Minagricultura,» 2 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Forms/DispForm.aspx?ID=3984>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [2] M. Madroño y J. Gonzalez, «El mercado del aguacate en Colombia,» 2023. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/cenes/v42n75/0120-3053-cenes-42-75-273.pdf>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [3] M. Salmerón, «Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.,» Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/391/1/SALMERON-RUIZ-ML14.pdf>. [Último acceso: Agosto 2024].
- [4] L. Caballero, «Producción de bioetanol a partir de residuos de aguacate,» Repositorio UMSNH Producción de bioetanol a partir de residuos de, Agosto 2021. [En línea]. Available: [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/4937](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4937). [Último acceso: Marzo 2024].
- [5] Zschimmer Schwarz, «Zschimmer Schwarz,» 6 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-son-los-biopolimeros/>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [6] M. Phuong, M. Escribà, V. Hessel y B. Coad, *A Review of the Current and Future Prospects for Producing Bioplastic Films Made from Starch and Chitosan*, 2022.
- [7] D. Rengifo y E. Tellez, *Elaboracion de biopelicula a partir de la semilla de aguacate variedad lorena*, Bogota: Facultad de Ingeniería - Ingeniería Química. Fundación Universidad de América, 2023.
- [8] P. Castro, *Biopelículas Bioreticuladas Obtenidas de la Semilla de Aguacate Hass*, Morelia, Mich: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2020.
- [9] The Nature Conservancy, «nature.org,» [En línea]. Available: <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestras-prioridades/ciudades-saludables/detener-residuos-plasticos/>. [Último acceso: Mayo 2024].

- 
- [10] Minagricultura, «Minagricultura,» Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [11] D. Apata y A. Ologhobo, «Biochemical evaluation of some Nigerian legume seeds,» de *Food Chemistry*, Ibadan, Nigeria, Unidad de Bioquímica nutricional, Departamento de producción animal. Universidad de Ibadan., 1994, pp. 333-338.
- [12] V. Sanchez y G. Loarca, «Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos,» 2022. [En línea]. Available: <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume7/7/10/49.pdf>. [Último acceso: Junio 2024].
- [13] S. Dicenta, «Archivos latinoamericanos de nutrición,» Pontificia Universidad Católica de Chile, [En línea]. Available: <https://lc.cx/kuQ2Wv>. [Último acceso: Junio 2024].
- [14] G. Mendoza et al., «Estructura del Almidon,» de *Alimentación de ganado bovino con dietas altas en grano*, 2017.
- [15] M. Hernandez et al., *Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México*, Yucatan, Mexico: Universidad Autónoma de Yucatán, 2008.
- [16] «Plantas y Hongos,» [En línea]. Available: <https://www.plantasyhongos.es/glosario/amilosa.htm>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [17] I. Hernandez et al., *Estudio de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de mezclas de almidón de papa y almidón de maíz ceroso*, Boletín De Ciencias Agropecuarias Del ICAP, 3(6)., 2017.
- [18] B. Montaña, *Características Físicas y Mecánicas de Biopelículas Elaboradas a Partir de Almidón de Trigo Cristalino (Triticum durum)*, Hermosillo, Sonora: Especialidad almacenamiento y Procesamiento de granos., 2007.
- [19] A. Carbajal, «Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid ,» [En línea]. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/458-2013-07-24-cap-7-hidratos-carbono.pdf>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [20] G. Ramírez, *Extracción con ultrasonido y su efecto sobre las propiedades funcionales y estructurales del almidón de frutos de guanábana (Annona muricata L.)*, Xalisco, 2020.

- [21] W. Nizama, *Técnicas de extracción de almidón de frutas y residuos vegetales*, Sullana, Perú.: Escuela profesional de ingeniería de industrias alimentarias., 2021.
- [22] Universidad de Murcia, «Práctica - humedad,» [En línea]. Available: <https://www.um.es/web/innovacion/plataformas/ocw/listado-de-cursos/higiene-inspeccion-y-control-alimentario/practicas/determinacion-de-la-humedad>. [Último acceso: Agosto 2024].
- [23] M. Ajcip, *Evaluación del comportamiento de la electrorreología del almidón a través de campos eléctricos inducidos por una corriente eléctrica.*, Guatemala: Facultad de Ingeniería - Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2022.
- [24] C. Castro et al., «Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro,» *Revista Colombiana de Materiales*, pp. 01-04, 8 y 9 junio 2017.
- [25] D. Klemm et al., *Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material*, Weinheim: Polymer Science, 2005.
- [26] A. Sanz, «Química Orgánica Industrial,» [En línea]. Available: <https://www.eii.uva.es/orgánica/qoi/tema-03.php>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [27] P. Prinsen, *Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas*, Sevilla: Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS) Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2010.
- [28] A. Sanchez, *Síntesis de nanopartículas derivadas de biopolímeros extraídos de biomasa por métodos térmicos*, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015.
- [29] G. Criollo, *Extracción de celulosa de cáscara de naranja, estudio del método y aplicaciones*, Riobamba: Facultad de Ciencias - Ingeniería Química. Escuela superior politecnica de Chimborazo, 2018.
- [30] E. Cabascango et al., *Técnicas de extracción de celulosa en residuos agroindustriales*, 2021.
- [31] J. Moran, *Extracción de celulosa y obtención de nanocelulosa a partir de fibra sisal - caracterización*, Mar de Plata, Argentina.: División Polímeros – INTEMA - Universidad Nacional de Mar del Plata , 2008.

- [32] Y. Quigua y J. Garcia, *Diseño de una biopelícula a partir de un biopolímero almidón de Manihot Esculenta “yuca” para la liberación de fármacos-sulfonamidas en cavidad oral*, Neiva, Huila: Facultad de Odontología - Universidad Antonio Nariño, 2020.
- [33] N. Chocano, *Propiedades físicas y mecánicas de una biopelícula formulada con almidón de papa (Solanum tuberosum) y mucilago de nopal (Opuntia ficus)*, Apurimac, Perú: Universidad Nacional José María Arguedas, 2019.
- [34] J. Escobar, *Elaboracion y caracterización de biopelículas elaboradas con quitosan y adicionadas con partículas de almidón*, Toluca de Lerdo: Facultad de Ciencias - Biotecnología. Universidad autonoma del estado de Mexico, 2020.
- [35] D. Escobar et al., *Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador*, Uruguay: Gerencia de Proyectos Alimentarios, Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), 2009.
- [36] C. Dennis J, «Blade and roll coating,» de *Liquid Film Coating: Scientific principles and their technological implications.*, Springer, Dordrecht, CHAPMAN & HALL, 1997, pp. 539-571.
- [37] Marcilla y Beltran., «Tecnología de polimeros,» de *Extrusión*, España., Universidad de Alicante. Servicio de publicaciones, 2012.
- [38] L. Duque et al., *Electrospinning: la era de las nanofibras*, Revista Iberoamericana de Polímeros, 2013.
- [39] «El mundo del marine surveyor,» [En línea]. Available: <https://vmasseyors.blogspot.com/2018/03/aguacate.html>. [Último acceso: Abril 2024].
- [40] J. Socatres, *Infrared Characteristic Group Frequencies*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [41] J. Figueroa, J. Salcedo y M. Rodriguez, *Acetilación de almidón nativo de batata*, Colombia, 2016.
- [42] S. Mussatto, G. Dragone, M. Fernandes y George J. M. Rocha, *Efecto de los tratamientos de hidrólisis ácida e hidrólisis alcalina en la estructura del bagazo de malta para liberación de fibras de celulosa*, Brasil: Universidade de São Paulo – EEL - USP, 2006.

- 
- [43] K. Delgado, D. Moreno, M. Juarez, R. Hernandez, S. Brachetti y D. Palma, *Extracción y caracterización de celulosa a partir de vasos de café*, Ciudad de México: JEEOS, 2023.
- [44] M. Colomer, *Straightforward synthesis of Ti-doped YSZ gels by chemical modification of the precursors alkoxides*, New York: Springer Science+Business Media New York 2013, 2013.
- [45] Pineda, Rosales, Coral, Arciniegas y Rodriguez, *Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido*, Manizales, Colombia.: Ingeniería y Ciencia, 2010.
- [46] J. Alvarado y R. J., «redalyc.org,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/485/48557615006/html/>. [Último acceso: Agosto 2024].
- [47] A. Zaldivar y J. Barrera, *Potencial uso de la cáscara y semilla de aguacate como fuente de compuestos bioactivos con propiedades funcionales para un desarrollo sustentable.*, Hidalgo, Mexico. : Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP, 2023.
- [48] L. Caycedo, L. Corrales y D. Trujillo, *Bacteria, nutrition and growth: a look from chemistry*, Bogota: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, 2021.
- [49] Compound Chem, *The chemistry of an avocado*, 2014.
- [50] L. Perez, «Teoría de la sedimentación» Instituto de ingeniería sanitaria y ambiental.
- [51] W. L. McCabe, *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, Mc Graw Hill, 1998.
- [52] U. A. d. México, «Portal Académico CCH,» Universidad Autónoma de México, [En línea]. Available: <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/quimica1/unidad1/mezclas/coloides>. [Último acceso: 25 Junio 2024].
- [53] Y. Trujillo, N. Villamizar y D. Duran, *Caracterización de la polifenoloxidasasa en tres variedades de papa (Tuberosum solanum L.) mínimamente procesada y su incidencia en el color*, Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Universidad de Pamplona, 2012.
- [54] M. Ek, G. Gellerstedt y G. Henriksson, *Química y tecnología del papel*, De Gruyter, 2009.
- [55] g. Leon, D. Leon, M. Mitzi, S. Angarita y A. Herrera, *Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética*,

Cartagena, Colombia: Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica, vol. 39, núm. 5, pp. 620-626., 2020.

[56] A. Molina y J. Castilo, *Biopolímeros como sistemas de bioencapsulación*, 2020.

[57] E. Gomez, «Hidrolisis Y Asimilacion De Macronutrimientos,» [En línea]. Available: <https://www.calameo.com/read/0062418553631a7414f1a>. [Último acceso: Junio 2024].