

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Desarrollo de bioplásticos a partir del cactus *Echinopsis pachanoi* y de algas del litoral peruano

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Ingeniería y
Ciencia de los Materiales que presenta:

Erika Fabiola Vicente Meléndez

Asesor:

Dr. Fernando Gilberto Torres García

Lima, 2023

Informe de Similitud


Yo, Fernando Gilberto Torres García, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis de investigación titulada **“Desarrollo de bioplásticos a partir del cactus *Echinopsis pachanoi* y de algas del litoral peruano”**, de la autora Erika Fabiola Vicente Meléndez, código PUCP: 19930348, alumna de la Maestría en Ingeniería y Ciencia de los Materiales.

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 12%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/05/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, Perú 16/05/2023.

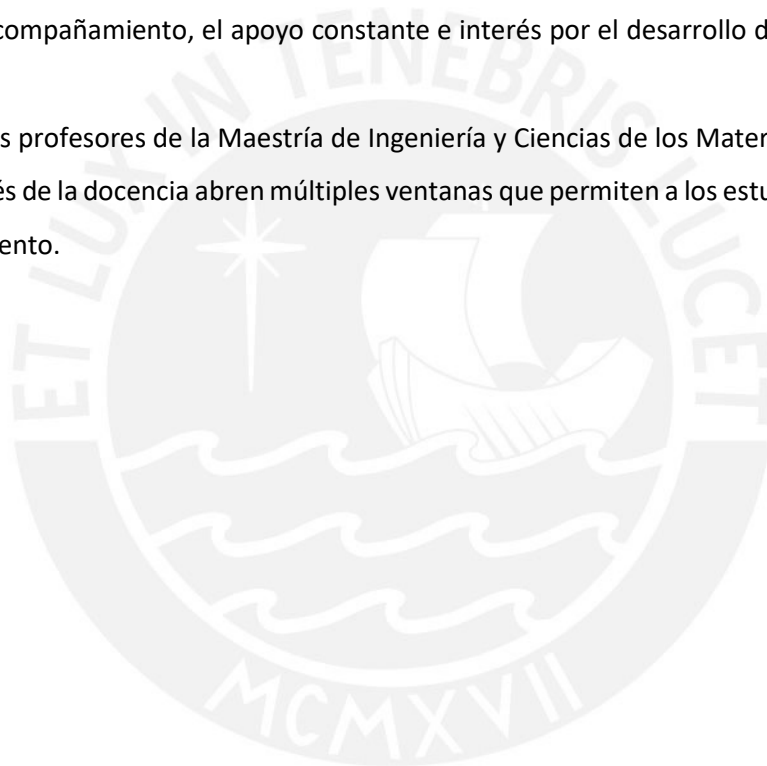
Torres García, Fernando Gilberto	
DNI: 07879100	
ORCID: 0000-0002-3123-266X	

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CONCYTEC PROCIENCIA que financió el presente trabajo en el marco del concurso “Proyectos de Investigación Básica 2020-01” [Contrato N° 121-2020-FONDECYT], dentro del proyecto “Síntesis de bioplásticos a partir de polisacáridos sulfatados extraídos de algas verdes del litoral peruano con aplicaciones potenciales en almacenamiento de energía limpia”.

Agradezco al profesor Dr. Fernando G. Torres quien dirige el Laboratorio de Polímeros y Bionanomateriales de la PUCP, por el soporte y asesoramiento brindado en el presente trabajo. Del profesor Torres destaco su gran interés en el desarrollo de la investigación de la ciencia básica y aplicada en el Perú, más aún cuando nuestro país no es un medio sencillo para este propósito. También agradezco al profesor Dr. Omar Troncoso y a la Mg. Karen Gonzales por las asesorías, el acompañamiento, el apoyo constante e interés por el desarrollo de la ciencia y de las personas.

Agradezco a los profesores de la Maestría de Ingeniería y Ciencias de los Materiales de la PUCP quienes a través de la docencia abren múltiples ventanas que permiten a los estudiantes avanzar en el conocimiento.



DEDICATORIA

A Anicia, María Elena y Enrique a quienes les debo el tiempo, la calma, el soporte y la buena compañía para realizar este aporte.

A Santiago y las nuevas generaciones que me inspiran y transmiten la fuerza para avanzar en los retos que se presentan.

A mis padres, Elena y Enrique, quienes siempre alentaron el aprendizaje y el conocimiento.

A mis amigos y amigas, quienes acompañan este camino, haciéndolo más alegre y cálido.

A Javier, quien apoyó y acompañó cada aventura, aunque le pareciera dislocada.



RESUMEN

Actualmente, existe interés en la caracterización de biopolímeros naturales y su uso en el desarrollo de bioplásticos con el fin de sustituir los plásticos derivados del petróleo que son de difícil descomposición o que impactan negativamente el medio ambiente. Este trabajo se centra en la caracterización del mucílago del cactus *Echinopsis pachanoi* (*E. pachanoi*) y el desarrollo de bioplásticos a partir del mucílago del *E. pachanoi* y algas del litoral peruano como son *Ulva nematoidea* y *Chondracanthus chamissoi*.

Se desarrolló un proceso efectivo para la obtención del polvo de mucílago de *E. pachanoi*. Los ensayos FTIR, DSC y TGA permitieron estudiar las características iniciales de dicho biopolímero. Asimismo, los estudios reológicos del gel de *E. pachanoi* dieron como resultado un comportamiento predominantemente elástico y un comportamiento de deformación reversible.

Se fabricaron films basados en mezclas de mucílago de *E. pachanoi*, ulva y carragenina. Los principales resultados indicaron que el mucílago promueve, dependiendo del tipo de mezcla, la modificación de las propiedades térmicas y mecánicas de los films. En el caso del film de mucílago con carragenina, se obtiene un material más flexible y de menor resistencia; por el contrario, cuando se mezcla con ulvan se obtiene un material más rígido y resistente.

Los resultados del presente trabajo indican que biopolímeros como el mucílago de *E. pachanoi*, ulvan y carragenina, que son materiales abundantes, renovables, biodegradables y no tóxicos para el ser humano, pueden ser utilizados para fabricar bioplásticos y, en el futuro, cubrir demandas de coberturas comestibles y otros.

Palabras clave: mucílago de cactus, *Echinopsis pachanoi*, biopolímeros, ulvan, carragenina.

ABSTRACT

Nowadays, there is interest about natural biopolymers characterization and their use for the development of bioplastic in order to replace petroleum-derived plastics, which are hard to decompose or have negative impact on the environment. This work focuses on the characterization of the mucilage of the cactus *Echinopsis pachanoi* (*E. pachanoi*) and development of bioplastics from mucilage *E.pachanoi* and algae from Peruvian coast such *Ulva nematoidea* and *Chondracanthus chamissoi*.

An effective process for obtaining *E. pachanoi* mucilage powder was developed. FTIR, DSC and TGA tests of the mucilage powder allowed to know its initial characteristics. Likewise, the rheological studies of the *E. pachanoi* gel resulted in a predominantly elastic behavior and reversible deformation.

Films based on blends of *E. pachanoi* mucilage, ulva and carrageenan were made developed. The main results indicated that mucilage promote, depending on the type of the mixture, the modification of the thermic and mechanical properties of the films. In the case of the film of mucilage and carrageenan, a more flexible and less resistant material is obtained; on the contrary, the mixture with ulvan, more rigid and resistant material is obtained.

The present work results indicate that biopolymers as *E. pachanoi* mucilage, carrageenan, which are abundant, renewable, biodegradable and non-toxic materials for humans, can be used to manufacture bioplastics that, in the future, they can cover demands for edible coatings and other uses.

Keywords: cactus mucilage, *Echinopsis pachanoi*, biopolymers, ulvan, carrageenan.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
ÍNDICE DE CONTENIDO	7
LISTADO DE FIGURAS	9
LISTADO DE TABLAS	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	16
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. Biopolímeros y polímeros naturales.....	16
1.2. Mucílago de cactus.....	18
1.2.1. Extracción de mucílago.....	20
1.2.2. Reología.....	21
1.3. Ulvan y carragenina.....	24
1.4. Aplicaciones.....	29
1.4.1. Generalidades.....	29
1.4.2. Bioplásticos.....	32
1.5. Teoría de mezclas.....	41
CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	44
2.1 Listado de equipos y reactivos.....	44
2.2 Descripción de muestras de <i>E. pachanoi</i>	44
2.3 Obtención de polvo de mucílago del cactus <i>E. pachanoi</i>	45
2.4 Obtención de ulvan y carragenina a partir de algas del litoral peruano.....	47
2.5 Films basados en mucílago de <i>E. pachanoi</i> , ulvan y carragenina.....	54
2.5.1. Films de <i>E. pachanoi</i> . EP0%GLI, EP10%GLI, EP15%GLI.....	54
2.5.2. Films de ulvan. UL10%GLI.....	55
2.5.3. Films de ulvan y <i>E. pachanoi</i> . EPUL10%GLI, EPUL15%GLI.....	55
2.5.4. Films de carragenina. CA10%GLI.....	55
2.5.5. Films de carragenina y <i>E. pachanoi</i> . EPCA10%GLI, EPCA15%GLI.....	55
2.6 Caracterización del polvo de mucílago de cactus.....	56
2.6.1. Estructura (FTIR – ATR).....	56

2.6.2. Análisis térmico (DSC - TGA).....	56
2.7 Reología de <i>E. pachanoi</i>	57
2.8 Caracterización de los films.....	58
2.8.1. Estructura (FTIR - ATR)	58
2.8.2. Análisis térmico (DSC - TGA).....	58
2.8.3. Caracterización mecánica (tracción)	58
2.8.4. Caracterización morfológica (AFM).....	59
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1 Caracterización del polvo de mucílago de <i>E. pachanoi</i>	60
3.1.1. Extracción de polvo de mucílago.....	60
3.1.2. Estructura FTIR - ATR.....	60
3.1.3. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	62
3.1.4. Análisis termogravimétrico (TGA)	63
3.2 Reología del gel de <i>E. pachanoi</i>	64
3.3 Caracterización de los films a partir de <i>E. pachanoi</i> , ulvan y carragenina.....	67
3.3.1. Formación de films	67
3.3.2. Estructura FTIR - ATR.....	71
3.3.3. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	73
3.3.4. Análisis termogravimétrico (TGA)	77
3.3.5. Caracterización mecánica – Ensayos a Tracción.....	80
3.3.6. Caracterización morfológica – AFM	83
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	88

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Imágenes representativas de <i>E. pachanoi</i> . a. Tallo. b. costillas. c. aureola y espina. Tomado de [22]. d. Tallo con flor. Tomado de [23]. e. Ilustración de Madsen (1989). A. Tallo. B. Sección longitudinal de la flor. C. Fruto. D. Semillas. Tomado de [24]	15
Figura 2. Estructura química del mucílago del cactus <i>Opuntia ficus indica</i> . Tomado de Lynn Buttice [41].	19
Figura 3. Distribución de los polisacáridos de la pared celular de <i>Ulva sp.</i> Esquema de la sección transversal del thallus (A) y asociaciones propuestas entre los diferentes polisacáridos de la pared celular (B). Tomado de [60].	26
Figura 4. Nomenclatura y estructura de las principales unidades de disacáridos que se repiten en ulvan. Ácido ulvanobiurónico A _{3s} , ácido glucurónico (en azul) unido a ramnosa 3-sulfato (en rojo); similarmente, en B _{3s} también contiene ramnosa 3-sulfato, pero tiene ácido idurónico (en verde) en el lugar del ácido glucurónico. Las ulvanobiosas constan de rhamnosa 3-sulfato unido a xilosa (en naranja). Xilosa puede contener un grupo sulfato, como se observa en U _{2's,3s} . Tomado de [58].	26
Figura 5. Mecanismo de gelación del ulvan. Las líneas representan un material parecido a fibras que están constituidas por proteínas, glucuronan y/o segmentos de ulvan extendidos. Interacciones entre el material similar a la fibra y la estructura similar a perlas de ulvan y el ensamble de estructuras parecidas a perlas pueden implicar interacciones iónicas similares. Tomado de [64].	27
Figura 6. Estructuras de distintos tipos de carragenina [67]	28
Figura 7. Films de mucílago de cactus plastificado con glicerol (A), sorbitol (B), PEG 200 (C) y PEG 400 (D). Tomado de [83].	33
Figura 8. Efecto del recubrimiento en la apariencia de la piña cortada a 6,9,12, 15 y 18 días, reportado por Treviño-Garza et al [92]. La fila CH-NM corresponde al recubrimiento de quitosano y mucílago de cactus.....	36
Figura 9. Rodajas de <i>Dioscorea spp.</i> con recubrimiento de tres formulaciones: de control, recubierto con mucílago, almidón y glicerol y recubierto con solo mucílago. Tomado de [81].	37
Figura 10. Diagrama de fase, que muestra el comportamiento de lcst y lcst para mezclas de polímeros. Tomado de [103].	43
Figura 11. Imágenes representativas del cactus <i>E. pachanoi</i> , de 5 cm de diámetro y 60 cm de longitud. A. Espécimen de <i>E. pachanoi</i> . B. Trozado del cactus y retiro de espinas. C. Secciones transversales del cactus.....	45
Figura 12. Imágenes representativas de los productos obtenidos durante el proceso de extracción de polvo de mucílago. A. precipitado del mucílago en alcohol isopropílico. B. recuperación del precipitado. C. polvo de mucílago seco y molido.	46
Figura 13. Diagrama del proceso de extracción de polvo de mucílago de <i>E. pachanoi</i>	47
Figura 14. Alga de la especie <i>Ulva nematoidea</i>	48

Figura 15. Imágenes representativas de la extracción de ulvan. a) proceso de filtrado. b) precipitado del ulvan c) ulvan obtenido del precipitado.....	49
Figura 16. Protocolo de extracción de polvo de ulvan	50
Figura 17. Alga de la especie <i>Chondracanthus chamissoi</i>	52
Figura 18. a) Alga <i>Chondracanthus chamissoi</i> en estado fresco. b) carragenina purificada.	52
Figura 19. Protocolo general de extracción de la carragenina.	53
Figura 20. Espectrómetro FTIR Perkin Elmer Spectrum Two con accesorio ATR utilizado en los ensayos.	56
Figura 21. Reómetro Discovery HR1 durante el ensayo.	57
Figura 22. Equipo Mark -10 en el ensayo de tracción	59
Figura 23. Resultados FTIR del polvo de mucílago de <i>E. pachanoi</i> . Las líneas llenas corresponden a muestras calentadas (60 y 80°C) y las líneas punteadas a muestras sin tratamiento de calor.	61
Figura 24. Termograma representativo DSC del polvo de mucílago de <i>E. pachanoi</i>	62
Figura 25. Termograma representativo TGA del polvo de mucílago de <i>E. pachanoi</i>	63
Figura 26. Imagen representativa de la evolución de G' y G'' en función al barrido de deformación de la muestra de sección transversal del cactus <i>E. pachanoi</i> . La imagen insertada muestra la morfología del espécimen ensayado.	64
Figura 27. Imagen representativa de la evolución de G' y G'' en función de la frecuencia angular.....	66
Figura 28. Imagen representativa de la evolución de G' y G'' en función del esfuerzo para discos de <i>E. pachanoi</i> . El primer barrido (triángulos y cuadrados llenos) fue realizado con un esfuerzo oscilatorio creciente de 0 a 5500 Pa, y el segundo (triángulos y cuadrados sin relleno) corresponde a la aplicación decreciente de esfuerzo de 5500 a 0 Pa.....	66
Figura 29. Imágenes macro representativas de los films obtenidos y de microscopio (microscopio digital Dinolite Premier modelo FC-Z-OC2).	71
Figura 30. Espectro FTIR representativo de films de ulvan (UL10%GLI) y de la mezcla de <i>E. pachanoi</i> y ulvan (EPUL10%GLI y EPUL15%GLI).....	72
Figura 31. Espectro FTIR representativo de los films de carragenina (CA10%GLI) y de la mezcla de <i>E. pachanoi</i> y carragenina (EPCA10%GLI y EPCA15%GLI).....	73
Figura 32. Termograma DSC representativo de films de ulvan (UL10%GLI).....	74
Figura 33. Termograma DSC representativo de films de la mezcla de <i>E. pachanoi</i> y ulvan (EPUL10%GLI).	75
Figura 34. Termograma DSC representativo de films de carragenina (CA10%GLI).	76

Figura 35. Termograma DSC representativo de films de la mezcla de <i>E. pachanoi</i> y carragenina (EPCA10%GLI).....	76
Figura 36. Termograma representativo TGA de los films de ulvan (UL10%GLI).....	77
Figura 37. Termograma representativo TGA de los films de la mezcla de ulvan y <i>E. pachanoi</i> (EPUL10%GLI).....	78
Figura 38. Comparación de termogramas TGA de los films de ulvan y la mezcla de ulvan y <i>E. pachanoi</i>	78
Figura 39. Termograma representativo TGA de los films de carragenina (CA10%GLI).....	79
Figura 40. Termograma representativo TGA de los films de la mezcla de carragenina y <i>E. pachanoi</i> (EPCA10%GLI).....	79
Figura 41. Comparación de termogramas TGA de los films de carragenina y la mezcla de carragenina y <i>E. pachanoi</i>	80
Figura 42. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films UL10%GLI.....	82
Figura 43. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films EPUL10%GLI.....	82
Figura 44. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films CA10%GLI.....	83
Figura 45. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films EPCA10%GLI.....	83
Figura 46. Imágenes de microscopía de fuerza atómica de los films. (a) UL10%GLI, (b) EPUL10%GLI. (c) CA10%GLI, (d) EPCA10%GLI, en imágenes de 25 μm x 25 μm	84

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Procedimientos de extracción de mucílago de cactus en la literatura.	20
Tabla 2. Investigaciones sobre elaboración de films basados en mucílago de cactus. Tabla de Gheribi & Khwaldia [30] traducida al español.	38
Tabla 3. Investigaciones sobre recubrimientos basados en mucílago de cactus. Tabla traducida de Gheribi & Khwaldia [30]	39
Tabla 4. Films basados en <i>E. pachanoi</i> y otros polisacáridos.	54
Tabla 5. Resultados ensayos a tracción de los films	80



INTRODUCCIÓN

Actualmente, los materiales biológicos ocupan un lugar preferente en las investigaciones para el desarrollo de nuevos materiales, ya sea por el uso del material per se o porque inspiran materiales que imitan las estructuras observadas en estos, a los que se les llama materiales bioinspirados [1]. Asimismo, se viene poniendo atención a la investigación dirigida a reemplazar plásticos basados en petróleo por materiales biodegradables que tengan propiedades mecánicas competitivas [2]. Biopolímeros extraídos de diversas plantas terrestres y acuáticas son considerados prometedores en ese sentido; es por ello que se viene investigando sus características y posibles usos en la industria; en ese contexto, el presente trabajo se trata del desarrollo de bioplásticos a partir del mucílago de cactus *Echinopsis pachanoi* y algas peruanas como son *Ulvan nematoidea* y *Chondracanthus chamissoi*.

Los cactus en su gran mayoría son oriundos de América y comprenden 124 géneros y 1,438 especies; han venido siendo utilizados desde la antigüedad en alimentación, medicina, construcción, ornamento y otros.

El cactus *Echinopsis pachanoi* (*E. pachanoi*); (Britton & Rose) H. Friedrich & G. D. Rowley, 1974, (sinónimo: *Trichocereus pachanoi* (1920)) [3], es una planta arbórea con ramas erguidas, entre 3 y 6 m de alto, de color azul-verdoso, con costillas anchas y redondeadas, espinas usualmente pequeñas (1 cm) y desiguales de color amarillo marrón, tienen flores blancas de aproximadamente 23 cm de largo (ver Figura 1). Crece en medios áridos de Sudamérica principalmente en el Perú, Ecuador y Bolivia. En el medio académico, el cactus *E. pachanoi* ha sido estudiado principalmente debido a los alcaloides que contiene (mezcalina y hordenina) que han llamado la atención de los investigadores en neurociencia por sus efectos alucinógenos [4]–[6], sin embargo el mucílago cuenta con escasas referencias.

El Perú, entre 2009 y 2013, exportó más de 890 kg de harina y cáscara seca de *E. pachanoi* hacia Europa y América; siendo su procedencia el medio silvestre. Los ensayos químicos realizados en la harina dieron como resultado que contenían mezcalina en variadas concentraciones. Actualmente, está prohibida su extracción del medio silvestre para elaboración de harina, pero sí está permitido si procede de plantas cultivadas [7]. Además, el mucílago de *E. pachanoi* también es utilizado para mejorar la plasticidad de morteros de tierra en construcciones tradicionales en el norte del Perú, estabilización de suelos, etc. [8]. Los estudios de Sáenz et al [9] concluyen que el rendimiento del mucílago de cactus está directamente influenciado por la

temperatura, el riego y las lluvias; asimismo, la viscosidad del mucílago es mayor si el suelo es árido, y menos viscoso si el suelo es semi árido.

A pesar de los avances en la investigación de las propiedades de diversos géneros de cactus, como es la *Opuntia ficus indica* que viene siendo cultivada para alimentación y purificación el agua y como aditivo para la cal en construcción [10] [9], el mucílago del cactus *E. pachanoi* cuenta con escasa literatura científica respecto de su caracterización y uso.

El mucílago de cactus está compuesto por polisacáridos pécticos con gran capacidad de absorber agua y tienen la función de almacenar humedad en la planta; es este componente el que les permite vivir en climas áridos [11]. Su alta eficiencia en el uso del agua es atribuido a que los cactus tienen un Metabolismo Ácido de Crasuláceas (CAM por sus siglas en inglés) que muestra características anatómicas y fisiológicas particulares con la función de conservar agua, por lo que pueden subsistir y habitar en ambientes extremadamente áridos y cálidos [12]. Está compuesto principalmente por carbohidratos que presentan una estructura altamente ramificada; según la literatura, contiene monómeros como L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido galacturónico [13][14][15][16][17] [18]. Una de las especies de cactus más estudiada es la *Opuntia ficus indica*, los cladodios (tallo) presentan la siguiente composición de materia seca: cenizas (19-23%), ceras y lípidos (1-4 %), fibra (18%), proteínas (4-10%) y otros carbohidratos (64-71%). Además, entre el 88% y 95% de su peso es agua[19]. Similares resultados reportaron Trachtenberg & Mayer [20] en *Opuntia ficus indica* procedente de Jerusalén. En investigaciones de mucílagos de seis especies de opuntia como son *O. atropes*, *O. tomentosa*, *O. hyptiacantha*, *O. streptacantha*, *O. joconostle* y *O. ficus-indica* se encontró que presentan fibra dietaria entre 51.79 y 67.51%; los azúcares hallados fueron L-arabinosa (26.83–35.36%), D-galactosa (21.59–45.48%), D-xilosa (12.23–17.05%), ácidos urónicos (5.59–13.91%), D-glucosa (5.18–16.21%) y L-ramnosa (1.41–5.40%)[21].

Los mucílagos derivados de plantas y particularmente de cactus son relativamente fáciles de obtener y tienen un gran potencial de uso en distintas áreas como la agricultura, fabricación de alimentos, cosméticos e industria farmacéutica; dado que no son tóxicos, muchas veces son aptos para el consumo humano y tiene propiedades biodegradables [13].

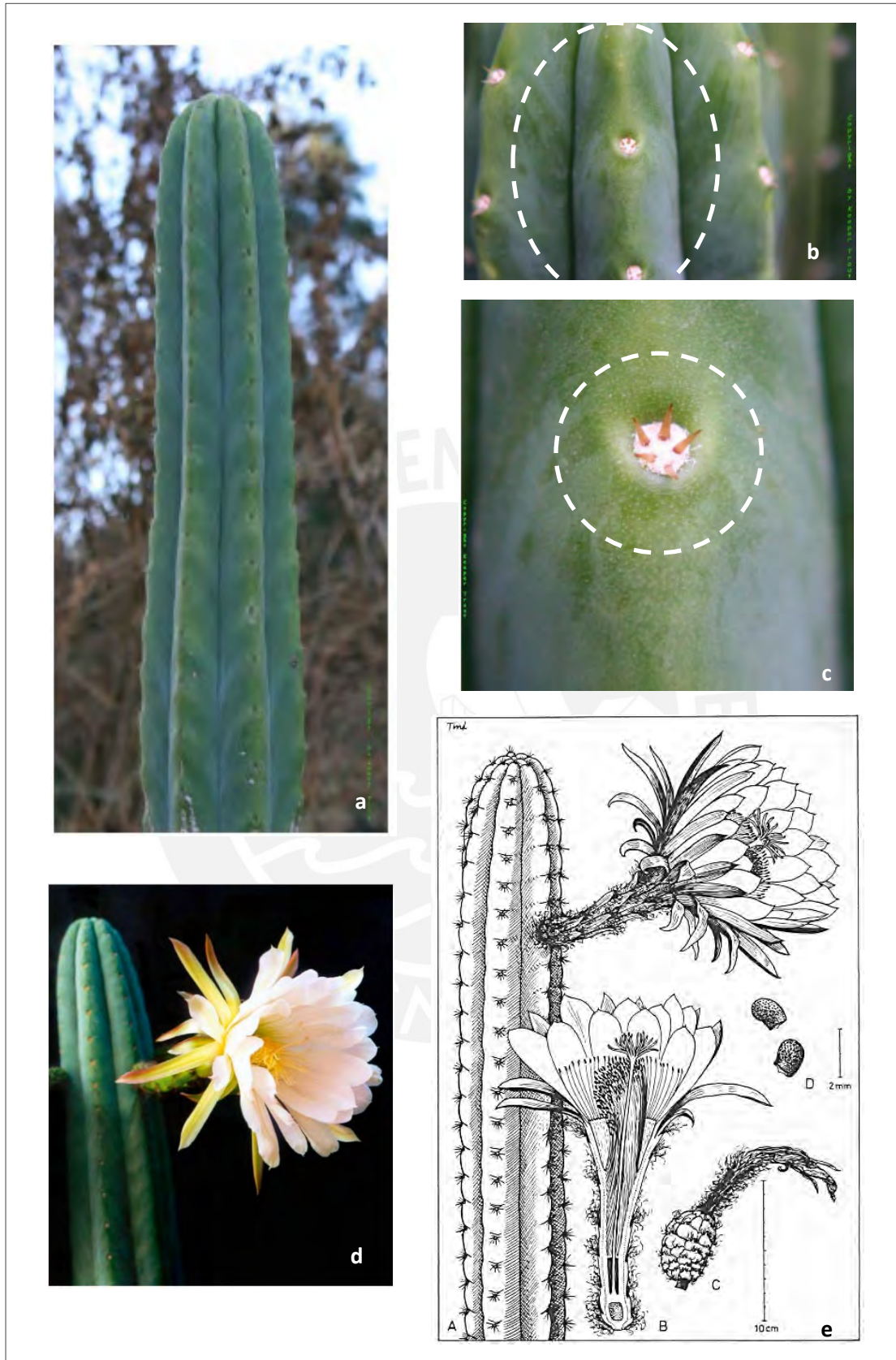


Figura 1. Imágenes representativas de *E. pachanoi*. a. Tallo. b. costillas. c. aureola y espina. Tomado de [22]. d. Tallo con flor. Tomado de [23]. e. Ilustración de Madsen (1989). A. Tallo. B. Sección longitudinal de la flor. C. Fruto. D. Semillas. Tomado de [24]

OBJETIVOS

General

Determinar el efecto del mucílago de cactus de *E. pachanoi* en la fabricación de films de ulvan y carragenina, procedentes de algas del litoral peruano.

Específicos

- Proponer un proceso de extracción de polvo de mucílago extraído del cactus *E. pachanoi*.
- Caracterizar el mucílago obtenido del cactus *E. pachanoi*.
- Fabricar materiales tipo films basados con el polvo de mucílago del cactus *E. pachanoi* y biopolímeros naturales como ulvan y carragenina.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1. Biopolímeros y polímeros naturales

Los biopolímeros son polímeros derivados de plantas, animales y microbios; dependiendo de su origen, pueden ser biopolímeros naturales extraídos de la biomasa, biopolímeros producidos por microbios o fermentación y biopolímeros sintetizados de la biomasa. Los biopolímeros obtenidos de la biomasa; estos a su vez pueden ser polisacáridos como ulvan, carragenina, almidones, celulosa, quitosano, quitina, alginatos y otros como las gomas y mucílagos. Estos últimos se hallan en una gran variedad de plantas, animales, algas marinas, hongos y otras fuentes microbianas. Estos polímeros tiene propiedades aglutinantes, espesantes, estabilizantes y humectantes; y vienen siendo estudiados para ser utilizados en la industria alimentaria y farmacéutica, pues la gran mayoría son considerados seguros para el consumo humano[25].

A continuación, se mencionan las ventajas de las gomas naturales y mucílagos relacionadas a la industria alimentaria y farmacéutica:

- Son biodegradables y no presentan impactos negativos en el ser humano y tampoco en el medio ambiente.
- Son recursos renovables, además, tienen procesos de producción sencillos, son fáciles de cosechar y se pueden recolectar en distintas épocas del año.
- Son biocompatibles y no tóxicos.
- Pueden generar oportunidades a países que dependen de la agricultura o acuicultura, que por lo general son países en vías de desarrollo.
- Con los procedimientos apropiados, el costo de manufactura podría ser menor al de materiales sintéticos.

- Existe menos efectos secundarios en pacientes que usan fármacos basados en materiales naturales, comparados con los sintéticos.
- La mayoría de gomas y mucílagos son comestibles.

Del mismo modo, también existen desventajas respecto a los materiales sintéticos, como se expone a continuación:

- Contaminación microbiana, los carbohidratos durante su producción están expuestos al medio ambiente y se pueden contaminar con microbios; sin embargo, esto se puede prevenir con un manejo apropiado y el uso de preservantes.
- Variaciones del material, pues al ser naturales dependen de su medio y de las estaciones del año.
- No es fácil de controlar el porcentaje de humedad en los materiales, pues existe variación en los porcentajes de sus componentes químicos dependiendo de la región donde se produce, la especie, las condiciones climáticas, etc.

Según los estudios de Jani et al [25] sobre gomas y mucílagos utilizados en farmacia, diversos biopolímeros se vienen utilizando en la industria farmacéutica por sus propiedades demulcentes (acción protectora) para la supresión de la tos, también como ingredientes para adhesivos dentales o como laxantes; los polímeros hidrófilos se utilizan como aglutinantes de comprimidos o como agentes que favorece la desintegración de las tabletas y liberación de las sustancias medicinales al entrar en contacto con la humedad; también como emulsionantes, agentes de suspensión, gelificantes, estabilizadores, espesantes, formadores de películas, comprimidos bucales, etc. Además, las gomas y mucílagos tienen potencial en la industria alimentaria debido a su capacidad de retener humedad y también pueden ser utilizados como estabilizadores, como, por ejemplo, para estabilizar helados, productos derivados de la carne, budines instantáneos, lácteos, confitería, bebidas y salsas. Por otro lado, existe un creciente interés en la industria cosmética, en textiles, adhesivos, litografía, pinturas y fabricación de papel.

Los estudios de Jani et al, Gheribi et al y De Andrade Vieira et al [25][26][27], mencionan que diversos mucílagos de cactus tienen gran potencial para el desarrollo de bioplásticos como films y recubrimientos agentes gelantes, emulsificantes, gasificante en fármacos; asimismo, coberturas comestibles en alimentos [28][29][30] y en el tratamiento y purificación de efluentes[31]- [32].

En el campo de la construcción, también los mucílagos vienen siendo utilizados para mejorar las propiedades de materiales de construcción como morteros de cal, arcilla y cemento, como aditivos mejoradores de la viscosidad [33][8][34][35].

1.2. Mucílago de cactus

El mucílago de cactus es un heteropolisacárido conocido por su alto peso molecular, entre 2.3×10^4 daltons y 3×10^6 daltons [9][36][37]; su estructura ramificada es producida por células altamente especializadas, que se acumulan entre las paredes y membranas celulares. Se hincha al disolverse en agua y forma suspensiones coloidales y viscosas. El mucílago en el cactus es almacenado en las células mucilaginosas presentes en la colénquima (células externas verdes) y parénquima (células blancas internas cilíndricas) donde son más abundantes. El hidrocoloide tiene una gran capacidad de retención de agua, el cual juega un rol muy importante en la fisiología de la planta que crece bajo condiciones de escasa agua; debido a esa capacidad, la cantidad de agua en los cactus puede llegar a ser mayor a 90% en temporada de lluvias y con contenidos de agua tan bajos como el 20% podrían reanudar su crecimiento sin llegar a morir; mientras que otras plantas mueren cuando su contenido de agua es menor al 50% [38]. Según estudios de Sepúlveda et al [15] y Goldstein et al [39] el mucílago consiste entre el 9-19% del total de peso seco de los tallos.

Los cactus varían en su acidez según la hora de la cosecha debido a que son plantas con Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM), lo que significa que asimilan el carbono durante la noche y tienen tejidos de almacenamiento de agua; la apertura de las estomas en la noche y la asimilación del CO₂, permiten la eficiencia en el uso del agua [39].

Si bien sobre el mucílago de cactus del *E. pachanoi* existe escasa literatura, sí existen investigaciones sobre el género *Opuntia ficus indica* y las tomaremos como referencia dado que presenta numerosa literatura. El mucílago de opuntia es un polisacárido que presenta entre 33 a 55 residuos de azúcares; diferentes estudios coinciden en que los mayores constituyentes neutrales en el mucílago con bajas variaciones en el contenido son arabinosa, galactosa, xilosa y ramnosa, mientras aún se cuestiona la presencia de ácido galacturónico [30].

Los monosacáridos más comunes en distintos tipos de cactus hallados por Saag et al [11] son D-galactosa, D-xilosa, L-arabinosa, L-ramnosa, y D- ácido galacturónico; aunque en distintas proporciones dependiendo del tipo de cactus, como 2,3,5-tri-O-methyl-arabinose, 2,3,4,6-tetra-O-methyl-galactose, 2,3,6-tri-O-methyl-galactose, 2,4,6-tri-O-methyl-galactose, 2,3,4-tri-O-methyl-xylose, 2,3-di-O-methyl-L-arabinose, 3-O-methyl-L-ramnosa. Sáenz et al. [9] compararon

la composición del mucílago de diferentes variedades de cactus. El mucílago de *Opuntia fulgida*, conocido como goma Cholla, tiene una estructura compleja que consiste en una cadena principal de unidades de galactosa con ramificaciones de ácido D-galacturónico, D-galactosa, D-xilosa y L-ramnosa. El mucílago de *Opuntia dillenii* consiste en una cadena principal de galactosa con cadenas ramificadas de unidades de arabinosa. También, menciona que el mucílago de *Opuntia ficus indica* está compuesto por fracciones ácidas que contienen arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido galacturónico con fracciones neutras de glucanos y glicoproteínas.

El mucílago de *Opuntia ficus indica*, consiste en una cadena lineal principal de ácido galacturónico conectado a ramnosa y los cuales están unidos con cadenas laterales compuestas por tres residuos de galactosa; residuos de arabinosa y xilosa derivan de la galactosa. La arabinosa está unida a la galactosa y xilosa está unida a la arabinosa. Algunas cadenas laterales de galactosa tienen arabinosa y algunas otras tienen dos residuos de arabinosa y uno de xilosa. En otros tipos de opuntia existen diferentes proporciones de estos residuos de azúcares. Se halló, además, que funcionan como un reservorio de almacenamiento de calcio. El 20% del calcio de las plantas está asociado a su mucílago, esto es debido a que la mitad del ácido carboxílico del ácido galacturónico crea una fuerte carga negativa; lo que causa que toda la molécula tenga una red de carga negativa[17], [18], [20], [36], [40].

En la Figura 2 se muestra la composición química del mucílago *Opuntia ficus indica*, que es una adaptación realizada por Lynn Buttice [41] a partir de los estudios realizados por Sáenz et al [9], Goycoolea et al [14] y Mc Garvis & Parolis [42], [43]. Presenta las subunidades arabinosa, galactosa, ácido galacturónico, ramnosa y xilosa.

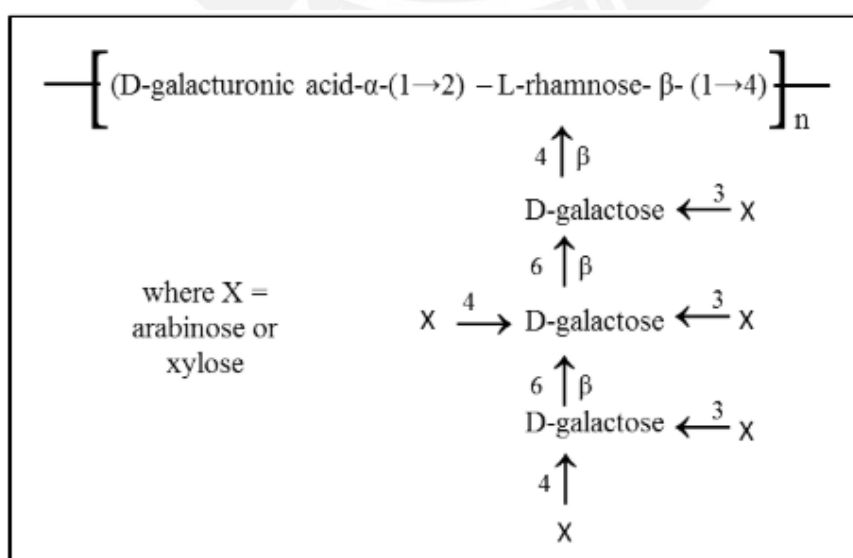


Figura 2. Estructura química del mucílago del cactus *Opuntia ficus indica*. Tomado de Lynn Buttice [41].

1.2.1.Extracción de mucílago

Existen diversos métodos de obtención del polvo de mucílago de cactus, como se puede ver en la Tabla 1. Después de la limpieza de los tallos, se retira la película externa y las espinas; luego se cortan y se tritura con agua destilada. La literatura menciona distintas proporciones de material:agua; que van desde 1:1 a 1:8 (w/v). Asimismo, se deja macerar en el agua entre 24 y 72 horas o no se macera. Existen procedimientos que incluyen el calentamiento a 80°C entre 5 min. y 2 horas. Dependiendo de la cantidad de agua agregada, se realiza la evaporación a 60 °C para concentrar el mucílago. Luego, se filtra con una tela delgada y pasa al centrifugado. Finalmente, se retira el sobrenadante y se precipita en alcohol isopropílico, etanol o acetona, generalmente, en proporciones de 1:3 o 1:4 (solución acuosa:solvente). Finalmente, se produce el secado en horno, al vacío, liofilizado, etc.

El rendimiento de la extracción de polvo de mucílago en los cactus está entre el 9-19% del total de peso seco de los tallos según los autores [15][39]; asimismo, mencionan que el rendimiento depende de las condiciones climáticas, como el frío y la lluvia, debido a la capacidad de estos polisacáridos de absorber agua como defensa de la planta ante situaciones de sequía. Además, la edad de cultivo influye en el rendimiento [17], así como el suelo; mejores rendimientos están relacionados con poca lluvia y climas muy soleados [44].

Tabla 1. Procedimientos de extracción de mucílago de cactus en la literatura.

Especie	Triturado/cogn a/ macerado	Temperatura	Centrifugado	Precipitado	Secado	Rendimiento* (g/100g)	Ref.
<i>Opuntia dillenii</i>	trituration con agua y 1% de ácido acético	sí	-	etanol con agitación constante**	sí	0.50%	[45]
<i>Opuntia monocanta</i>	Cortado/ macerado en agua	evaporado	***	etanol	liofilizado	0.53%	[17]
<i>Opuntia nopalea-coccinillifera</i>						0.48%	
<i>Cereus peruvianus</i>						1.60%	
<i>Wigginsia erinacea</i>						0.31%	
<i>Opuntia ficus indica</i>	-	-	-	-	-	1.20%	[46] tomado de [47]
<i>Opuntia ficus indica</i>	cortado en cubitos 1:3 nopal/agua (w/v)	cocido en etanol al 80%	5000g, 10000g y 15000g	etanol****	liofilizado	0.07	[16]

<i>Opuntia ficus indica</i>	licuado 1:5 nopal/agua (w/v)	evaporado	3560g	1:3 mucílago/alcohol isopropílico	-	1.50%	[15]
<i>Opuntia milpa Alta</i>	licuado 1:3.72 (nopal: agua)	86.1°C	3,000 rpm - 20 min	etanol al 95% - 48 horas a 4°C *****	secado al vacío a 40°C	0.70%	[48]
<i>Opuntia ficus indica</i>	molido 1:1 nopal:agua	escaldado 80°C - 5 min	5,000 rpm - 30 min	1:3 mucílago: acetona*****	secado al vacío en un desecador	0.85	[47]
<i>Opuntia ficus indica</i>						0.66	
<i>Opuntia ficus indica</i>						0.66	
<i>Opuntia ficus indica</i>						0.33	
<i>Opuntia ficus indica</i>	trozado 1:5 nopal:agua	cocido en agua - 30 min					
<i>Opuntia ficus indica</i>	licuado en agua deionizada	-	2240g	*****	liofilizado	0.085 - 0.091	[49]
<i>Opuntia littoralis</i>						0.18-0.34	
<i>Opuntia ficus indica</i>	molido 1:2 nopal:agua (w/v)	80°C - 1 hora y evaporado 150 min	3,500 rpm - 20 min	1:4 mucílago: etanol	-	0.5-0.6%	[50]
<i>Opuntia atrope</i>	cortado y licuado 1:8 nopal:agua (v/w)	83°C/2h	3,000 rpm - 15 min	1:4 mucílago:etanol por 24h	45°C/6h	2.62%	[44]
<i>Opuntia hyptiacantha</i>						2.11%	
<i>Opuntia joconostle</i>						3.21%	
<i>Opuntia streptacantha</i>						0.70%	
<i>Opuntia tomentosa</i>						1.81%	
<i>Opuntia atropes</i>	En cada caso se licuó con 3 proporciones nopal:agua 1:8 nopal:agua (w/v) 1:2 nopal:agua (w/v) 1:1 nopal:etanol 50% (w/v)	En cada caso se probaron 3 temperaturas 83°C - 2horas 83°C - 1horas 2°C	3,500 rpm - 15 min	1:4 mucílago/etanol 96%(v/v)	a 4°C	-	[21]
<i>Opuntia tormentosa</i>						-	
<i>Opuntia hyptiacantha</i>						-	
<i>Opuntia streptacantha</i>						-	
<i>Opuntia joconostle</i>						-	
<i>Opuntia ficus indica</i>						-	

* relativo al peso fresco

** tratamiento con acetona y tetracloruro de carbono

*** dializado

**** adicionalmente, se hizo un tratamiento con ácido tricloroacético

***** adicionalmente se lavó con acetona

***** se decoloró con hipoclorito de sodio al 12% con agitación suave durante 1h, luego fue filtrado y lavado con etanol.

***** ultrafiltrado (millipore)

1.2.2. Reología

Los biopolímeros vienen investigándose para el procesamiento, manejo y transformación de los alimentos; como gelantes, espesantes, estabilizantes; en farmacia, para fármacos administrados oralmente, donde es importante el incremento el tiempo de permanencia en su paso por el estómago y el intestino delgado para obtener la máxima absorción, llamada interacción de mucoadhesivos [51]. Conocer las propiedades reológicas es importante para las aplicaciones industriales como recubrimientos, texturas, etc. Muchas aplicaciones empíricas de extractos de cactus que contienen mucílago como pinturas, champús, jarabes, etc. están basadas en sus propiedades elásticas [36]. La caracterización reológica es esencial para obtener parámetros como el coeficiente de calor y masa transferida para el desarrollo del producto, el diseño y la evaluación del proceso de manufactura así como el empaque y las estrategias de almacenamiento [52].

La mayoría de las propiedades reológicas de polímeros reticulados flexibles están descritas por las teorías clásicas de "rubber elasticity" donde las hebras entre las retículas son como resortes cuya respuesta elástica bajo tracción o compresión se deriva del costo entrópico de los grados de libertad conformacionales reducidos de la hebra del polímero. Redes reticuladas son diferentes de las entrecruzadas, las cuales se mantienen unidas solo por entrecruzamientos entre polímeros. Redes entrecruzadas tienen mecanismos de relajación de esfuerzos, lo que son ausentes en los reticulados; el mecanismo más importante es reptación, que establece frecuencias características bajo las cuales la red entrecruzada exhibe una respuesta lineal viscoelástica que domina lo líquido ($G'' > G'$). En la red reticulada, no hay reptación ni relajación de esfuerzos, dominando la respuesta elástica ($G' > G''$). Más allá de la reptación, redes reticuladas o entrecruzadas son difíciles de distinguir reológicamente [53].

Las propiedades reológicas estudian y describen el flujo y deformación de los materiales; desde los sólidos ideales hasta los líquidos, cubriendo la gama de materiales viscoelástico como son los biopolímeros que usualmente son líquidos en solución y que pueden ser convertidos en sólidos blandos (geles) [54]. La reología de este tipo de materiales está relacionada a la estructura molecular de las cadenas polimérica entrecruzadas que conforman la red tridimensional. Las propiedades que se monitorean son el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función del tiempo. Predice la textura y comprensión de cambios moleculares y de conformación en materiales alimentarios; y son particularmente útiles cuando se pueden desarrollar relaciones predictivas para las propiedades reológicas que parten de la arquitectura molecular de los constituyentes [55].

El fin de los experimentos reológicos es cuantificar la viscoelasticidad dinámica en un rango de tiempo y deformación con el fin de relacionar sus propiedades viscoelásticas con la estructura del material. En las redes de polímeros, los polímeros están vinculados entre ellos por enlaces permanentes que evitan el movimiento relativo de los polímeros, el reticulado pueden ser enlaces covalentes entre polímeros, una molécula individual unida a múltiples filamentos o puntos de ramificaciones de una fibra larga en la red.

El módulo de almacenamiento G' está relacionado a la medición de la energía de deformación almacenada en la muestra durante el proceso de corte, esta energía está disponible cuando la carga aplicada es removida y actúa como la fuerza que compensa parcial o totalmente la deformación aplicada anteriormente. En el caso de que luego de retirada la carga no haya deformación y los valores de los módulos G' y G'' son similares, se dice que tiene una deformación reversible (*reversible stress softening*) y tiene almacenamiento de energía [56].

El módulo G'' está relacionado con la medición de energía de deformación utilizada en el proceso de corte y se pierde una vez que se retira la carga, es decir es la energía disipada del sistema. Esta energía se ha utilizado en los cambios que sufre la estructura interna del material estudiado o sale en forma de calor; si la estructura se encuentra modificada luego del ensayo, tenemos una deformación irreversible y se considera que el material ha perdido energía. Esta relación con la energía es el aspecto viscoso de un material [56].

La relación G''/G' da lo que se llama factor de pérdida o tangente de desfase $\tan(\delta)$. Es la relación entre la energía disipada y almacenada por el material y de la viscoelasticidad. Si el factor de pérdida es 0, el esfuerzo y la deformación están en fase y quiere decir que el material tiene un comportamiento elástico. Si es 1, el esfuerzo y la deformación están en desfase y tendrá comportamiento viscoso, si el factor de pérdida se halla entre los valores 0 y 1, el material presenta un desfase entre esos valores y el comportamiento será viscoelástico.

No se halló literatura sobre la reología en tejidos de cactus; lo que existen son investigaciones realizadas en México sobre la reología y viscoelasticidad en soluciones de *Opuntia ficus indica* vinculados a la industria alimentaria. Es por ello, que es importante estudiar la reología de los cactus con el fin de proponer futuras aplicaciones.

La literatura sobre viscosidad al cizallamiento constante en soluciones de opuntia menciona que muestra un comportamiento no newtoniano de corte deformación; la cuál podría ser correlacionada a los coeficientes de corte del modelo "power law" o "Ostwald de Waele", y sugiere una configuración "random coil". Las soluciones entre 3% - 10% de mucílago son

ligeramente dependientes de la temperatura y casi independiente de la concentración en el rango estudiado. Por otro lado, los resultados apuntan a que la viscosidad es dependiente de la fuerza iónica, del mismo modo que los polielectrolitos típicos, cuando la fuerza iónica se incrementa, la viscosidad disminuye; este comportamiento es más pronunciado cuando se usan iones divalentes. También se observó dependencia del pH de medios ácidos a alcalinos, la viscosidad se incrementa considerablemente. Asimismo, se halló que los esfuerzos normales a cizallamiento constante disminuyen a medida que la concentración del mucílago aumenta. Se observó que el comportamiento fluido (G'') y sólido (G') dependen de la concentración y frecuencia. Se observó un punto de encuentro entre G' y G'' en 35°C a frecuencias bajas; lo que sugeriría un reacomodo de los entrelazamientos a una configuración de "random coil". Investigaciones anteriores [16] dan resultados de ensayos de viscosidad en el mucílago de *Opuntia ficus indica* que muestran un comportamiento de cizallamiento – deformación inusual, pues las curvas no convergen en una sola función, en una típica lineal "random coil", como se espera en un polisacárido espesante; sino que se desprenden en la región de mayor concentración del mucílago. Este comportamiento ya se había visto en el mucílago de la okra (*Hibiscus esculentus L.*). Las soluciones de mucílago son comparables con polímeros sintéticos de alta elasticidad, pues tienen importantes propiedades de fluidez elástica, las cuales pueden ser utilizadas en aplicaciones industriales [36] [57].

1.3. Ulvan y carragenina

Ulvan

Ulvan es un polisacárido extraído de algas marinas verdes. El producto más conocido que se obtiene del ulvan es el polisacárido sulfatado, que se halla en la pared celular del alga y está compuesto principalmente por ramnosa sulfatada y ácidos urónicos, como es el ácido glucurónico y el ácido idurónico y xilosa. Dependiendo de la especie de *Ulva*, pueden tener otros polisacáridos en su pared celular, como son: celulosa, xiloglucano y glucuronan, pero en menor cantidad [58]. La forma como se asocian y se distribuyen en la pared de la pared celular de la *Ulva* se puede ver en el modelo que se presenta en la Figura 3, donde se toma en cuenta datos recientes citoquímicos y fisicoquímicos. Según la literatura, el peso molecular de ulvan se halla entre 6.60 y 7.60×10^4 daltons [59].

También se identificó que el ácido glucorónico y la ramnosa existen principalmente en forma de ácido aldobiourónico 4 – O - β -D-glucuronosyl-L-ramnosa. Se han reportado de distintas especies de ulvan; sus constituyentes son los siguientes: ramnosa (16.8 – 45%), xilosa (2.1-12%), glucosa (0.5-6.4%), ácido urónico (6.5-19%) y sulfato (16-2.32%) [60] y el ácido idurónico (1.1 – 9.1%)

[61]. Los dos disacáridos que se repiten principalmente son el ácido aldobiurónico designado como Tipo A, ácido ulvanobiurónico 3-sulfato (A_{3s}) y tipo B, ácido ulvanobiurónico 3 – sulfato (B_{3s}). Residuos de xilosa parcialmente sulfatada en O-2 también pueden estar en lugar de los ácidos urónicos. Además, el ácido glucurónico puede ramificarse en O2 de ramnosa 3 – sulfato; bajas proporciones de galactosa, glucosa, mannososa y proteína también se hallan en ulvan [62]. La estructura molecular del ulvan se muestran en la Figura 4.

En el mar del Perú, la *ulva nematoidea*, especie utilizada para el presente estudio, es abundante y frecuente en las costas protegidas del oleaje; se halla en los primeros 5 m de profundidad. Tiene tallo alargado color verde intenso y está escasamente ramificado [63].

Según Kidgell et al [58] el componente activo fundamental del *Ulva* es la fibra soluble ulvan, que es un polisacárido sulfatado gelificante; y, debido a su contenido de ramnosa y los ácidos urónicos, el ulvan es un material con gran potencial en la biociencia, nutracéutica, alimentos y agricultura. La característica particularmente interesante del ulvan es su capacidad de formar geles, se han elaborado geles rígidos concentrando extracto de *Ulva lactuca*, asimismo, se realizaron investigaciones donde se descubrió que, utilizando ácido bórico, iones de calcio y un pH entre 7.5 – 8, se obtiene un gel débil con ulvan extraído también de *Ulva lactuca*. Según estudios de Lahaye & Robic [60] dicho gel también se obtuvo con ulvan de proliferación, *Ulva spp.* (*Ulva armoricana*) y con otras como *U. rigida*, *U. rotundata* y *Enteromorpha sp.* Lahaye et al menciona que en óptimas concentraciones de ácido bórico (15-33 mM) y iones calcio (7 mM) con pH 7.5 se produjo un gel con ulvan de *U. armoricana*, a una concentración de 1.6% (w/v); se obtuvo un módulo de almacenamiento de 250 Pa. Más altas concentraciones de iones, pH más alto y más bajo o trisaminometano (Tris) y iones reguladores fosfato son perjudiciales para el gel. Ulvan en forma de sodio no forma gel al agregar ácido bórico a pH 7.5, lo que confirma que se requiere calcio o un catión divalente para la gelificación. Se obtuvieron geles de módulo elástico creciente con Cu > Zn > Mn > Ca para *U. armoricana*, de acuerdo con la afinidad de ulvan por estos iones, pero no se obtuvo gel con Mg. El análisis ultraestructural del gel de ulvan reveló una morfología de base esférica (10–18 nm de diámetro) más o menos agregada en solución acuosa. A pH 13 en TBAOH (hidróxido de tetrabutilamonio) o NaOH, el ulvan formó una estructura tipo gel abierto o una película continua por fusión o coalescencia de estructuras similares a perlas, mientras que, en condiciones de pH ácido, el ulvan apareció como perlas dispersas. Bajas concentraciones de cloruro de sodio, cobre o ácido bórico indujeron la formación de agregados. Estos resultados resaltan el comportamiento hidrofóbico y agregativo del ulvan que se discuten en relación con la peculiar formación de gel y la baja viscosidad intrínseca del polisacárido en solución acuosa [64]. Ver Figura 5.

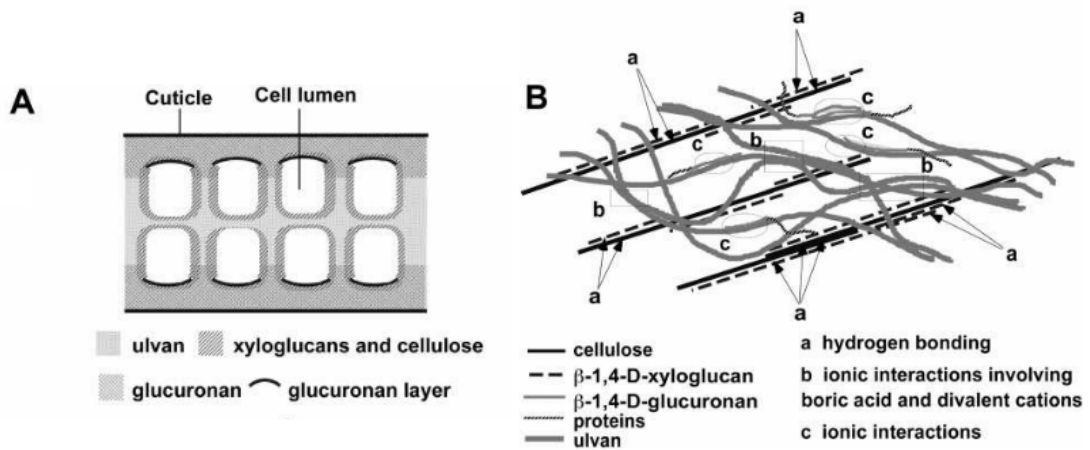


Figura 3. Distribución de los polisacáridos de la pared celular de *Ulva sp.* Esquema de la sección transversal del thallus (A) y asociaciones propuestas entre los diferentes polisacáridos de la pared celular (B). Tomado de [60].

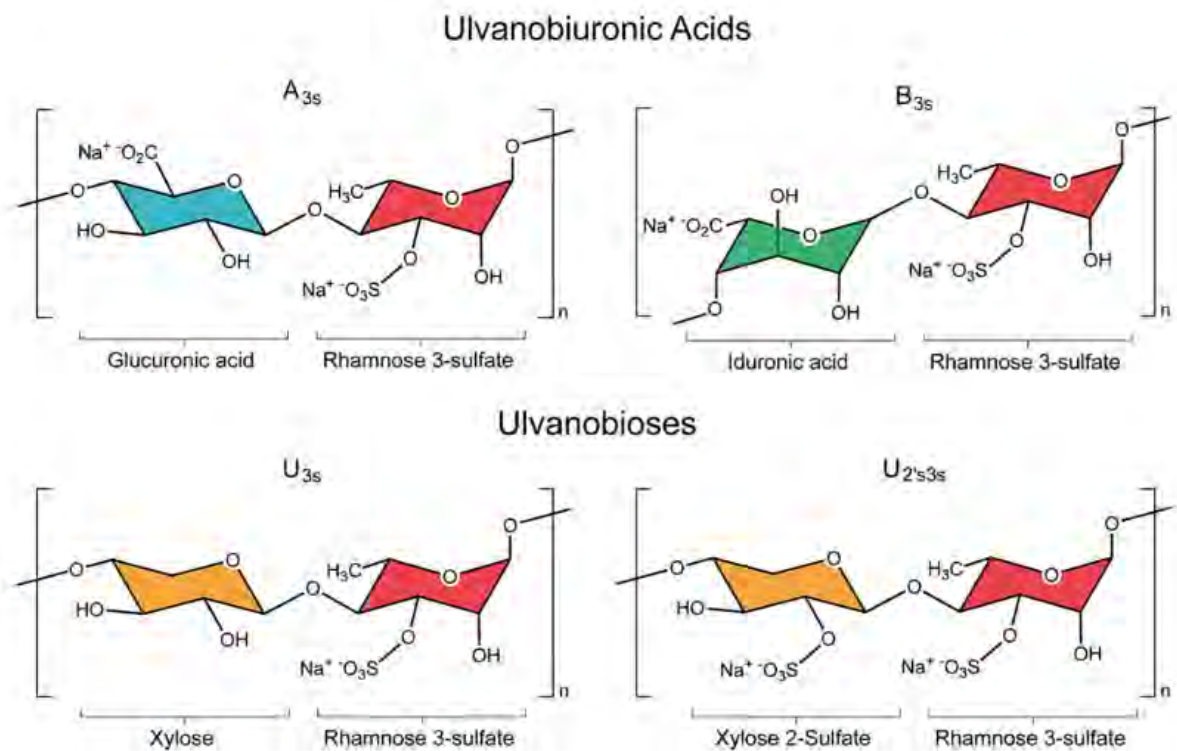


Figura 4. Nomenclatura y estructura de las principales unidades de disacáridos que se repiten en ulvan. Ácido ulvanobiurónico A_{3s}, ácido glucurónico (en azul) unido a ramnosa 3-sulfato (en rojo); similarmente, en B_{3s} también contiene ramnosa 3-sulfato, pero tiene ácido idurónico (en verde) en el lugar del ácido glucurónico. Las ulvanobiosas constan de ramnosa 3-sulfato unido a xilosa (en naranja). Xilosa puede contener un grupo sulfato, como se observa en U_{2's3s}. Tomado de [58].

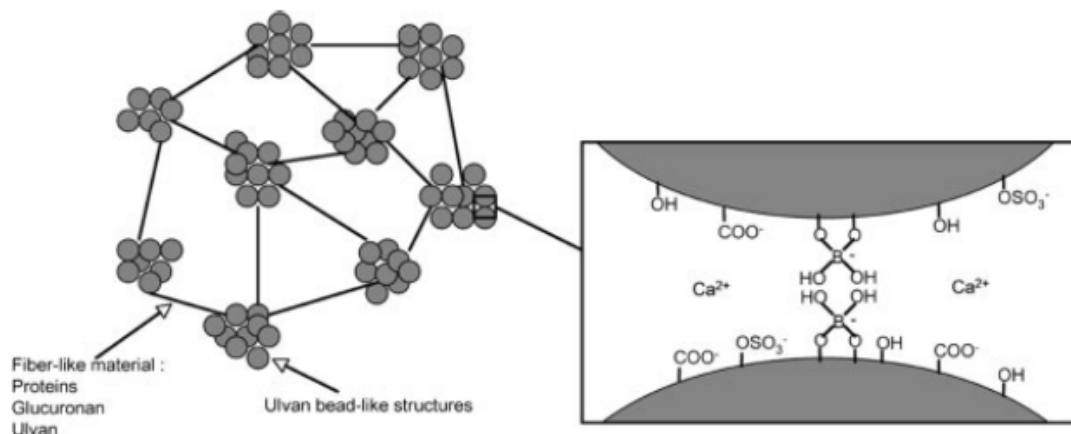


Figura 5. Mecanismo de gelación del ulvan. Las líneas representan un material parecido a fibras que están constituidas por proteínas, glucuronan y/o segmentos de ulvan extendidos. Interacciones entre el material similar a la fibra y la estructura similar a perlas de ulvan y el ensamble de estructuras parecidas a perlas pueden implicar interacciones iónicas similares. Tomado de [64].

Carragenina

La carragenina es un polímero natural que presenta propiedades gelantes o viscosas; se halla en las algas rojas, principalmente las algas de la familia *Rhodophyceae* y se extrae desde 1837. Dependiendo del alga, el tipo de extracción y etapa de vida del alga, se obtiene distintos tipos de carragenina. *Chondrus crispus* es considerada la fuente original de carragenina y presenta principalmente una mezcla de carragenina kappa (κ) y lambda (λ) y es recolectada principalmente en España, Francia, Portugal, Irlanda y la costa este de Canadá. Otras especies de donde se extrae carragenina son *Solieria sp.*, *Eucheuma sp.*, *Hypnea sp.*, *Iridaea sp.*, *Gigartina stellata* y *Agardhiella sp.* [65]. En el mar peruano existe el *Chondracanthus chamissoi*, que es un alga marina roja que se halla distribuida desde Paita en Perú (5° S) hasta Ancud en Chile (42° S); es muy explotada sobre todo en Chile, donde se utiliza como materia prima de carragenina y también para ser exportada como alga comestible. Según la literatura, el peso molecular de la carragenina se halla entre 20 y 80×10^4 daltons [66].

Su estructura corresponde a un polímero aniónico sulfatado formado por unidades como (1 \rightarrow 3)- β -D-galactopiranosas (unidades G) y 4- α -D-galactopiranosas (unidades D), o 4-3,6 anhidro- α -D-galactopiranosas (unidades DA), ver Figura 6.

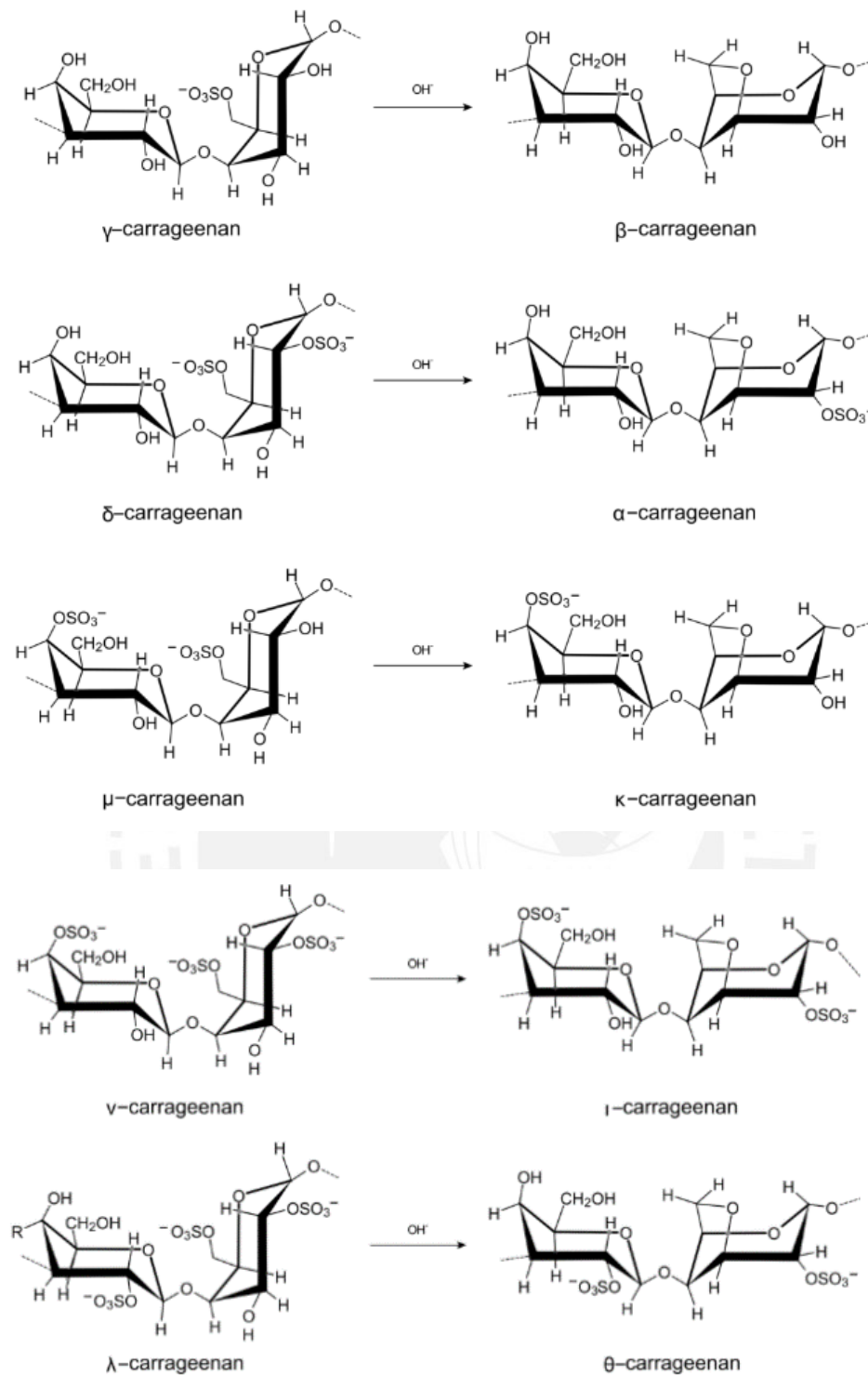


Figura 6. Estructuras de distintos tipos de carragenina [67]

En el proceso de extracción se suele neutralizar iones de sodio, potasio o calcio; ello influye en sus propiedades, especialmente en la formación de los geles y en la estabilización de soluciones. Así, existen carragenina tipo λ , κ , ι , β , ν , μ e híbridas; su clasificación se basa en su solubilidad en cloruro de potasio; las diferencias que influyen en las propiedades del tipo de carragenina es el número y posición del grupo éster sulfato, como el contenido de 3,6, anhidro-galactosa. Los

grupos sulfato son fuertemente aniónico, el cual es el único responsable de su reactividad química [65].

En el caso del *Chondracanthus chamissoi*, contienen carragenina del tipo κ y ι [68] [69]. Según los estudios, los tipos de carragenina que se obtienen dependen del método de extracción; se puede obtener carragenina híbrida compuesta por κ -carr (35%) y ι -carr (43%) a lo largo de su precursor μ -carr (22%) cuando se extrae en agua fría; pero también se obtiene κ -carr si se extrae en agua caliente; la estructura híbrida de la carragenina confiere una estructura compleja que debe ser estudiada [69]. Los 3 principales tipos de carragenina comerciales son los siguientes [65]:

- κ -carr: Compuesta por 3- β -D-galactosa 4-sulfato y 4-6-anhidro- α - galactopyranosa, alternando con un grupo sulfato por unidad de disacárido que se repite. Generalmente forma geles fuertes y rígidos con sales de potasio, sin embargo, se convierte en frágil con sales de calcio.
- ι - carr: Tiene dos grupos de sulfatos por unidad repetitiva de disacárido, los geles ι -carr son elásticos con sales de calcio.
- λ -carr: Es una carragenina altamente sulfatada y tiene 3 grupos sulfato por unidad repetitiva de disacárido, falta el puente 3,6 anhidrido, contrario al κ -carr. No puede formar gel, aunque forma soluciones altamente viscosas.

También existen otros dos tipos μ -carr y ν -carr, que son los precursores biológicos de κ -carr y ι -carr respectivamente y se forman por acción de la sulfhidrolasa [70].

1.4. Aplicaciones

1.4.1.Generalidades

La biomasa de los cactus es inagotable recurso de moléculas funcionales como carbohidratos, fibras, polifenoles, tintes y aceites. Biomasa derivada de los polisacáridos como son el mucílago, la celulosa y la pectina, ofrece ventajas sobre los polímeros sintéticos, como renovables, biocompatibles, completamente biodegradable y naturalmente disponible, es por lo que los estudios del uso del mucílago de cactus han crecido en los últimos años.

El mucílago de cactus tiene un rango amplio de propiedades fisicoquímicas [51] que dependen de sus características y estructurales y composición de monosacáridos; también, interactúan fácilmente con otros polímeros; se pueden usar como espesantes, gelantes, estabilizantes y emulsificadores en farmacia, cosmética y también para elaborar films y recubrimientos en la

industria alimentaria. También se viene estudiando para ser utilizado en ingeniería de tejidos, impresión en 3D y andamiaje para compuestos. El mucílago de cactus viene siendo empleado como agente floculantes para metales pesados en agua, como coagulante-floculante para tratamiento de efluentes textiles, como agente cicatrizante y reparador de la piel y también como agente de administración de fármacos.

Se viene estudiando el desarrollo de películas y recubrimientos a partir de biopolímeros y mezclas; los mismos que pueden ser enriquecidos con aditivos como aceites esenciales, extractos de plantas, enzimas y probióticos, los aditivos tienen el objetivo de proporcionar propiedades biológicas y funcionales como actividades antioxidantes y antimicrobianas [30].

Además, existen estudios enfocados en el uso de biopolímeros en el campo de la construcción; como aditivos mejoradores de la viscosidad en la producción de materiales basados en cemento, como son concreto autocompactante o morteros. Según los estudios de León-Martínez et al [35] se logró un satisfactorio aumento en la viscosidad de corte y el límite elástico de las pastas, morteros y concretos al incluir mucílago de nopal (*opuntia ficus indica*) y extracto de algas marinas marrones. Esto dependía de su naturaleza molecular, el entrelazamiento de cadenas y formación de las redes del gel. Asimismo, Chandra et al [71] reporta estudios sobre el uso de extracto de nopal en morteros de cemento; se observó que mejoró la plasticidad del mortero, la absorción de agua y la resistencia a las heladas y sal. El hidróxido de calcio producida por la hidratación del cemento Portland interactúa con los polisacáridos o proteínas y formas complejos; esto afecta el proceso de cristalización.

También existe interés de utilizar mucílagos de cactus y algas para mejorar materiales de construcción tradicionales, así como en la restauración de monumentos, pues se requieren tratamientos sostenibles, biodegradables y que ahorren energía que mejoren las características de resistencia y protejan de las inclemencias del clima y otros factores que los degradan y podrían generar su desaparición. La investigación en ese sentido ha avanzado en los últimos años, sobre todo, debido al inminente cambio climático. Como menciona Rescic et al [72] en el estudio experimental de conservación de adobes, el caso de las construcciones de tierra que presentan naturaleza frágil, se vienen estudiando polímeros sintéticos y biopolímeros, como resinas naturales, materiales nano estructurados y son evaluados en cuanto a sus propiedades de absorción de humedad, permeabilidad, colorimetría y ensayos de envejecimiento. En México, se vienen realizando estudios sobre el uso de jugo de nopal en relación a la preparación de mortero de cal para la restauración y protección de monumentos históricos, para evitar la penetración de agua y la fisuración, como lo realizado por Cárdenas et al [73], quienes realizaron

ensayos de pastas con hidróxido de calcio y cal apagada comercial con distintas concentraciones de jugo de nopal y caracterizaron su resistencia.

Estudios realizados por Achenza & Fenu [74] utilizando fibra y compuestos de polímeros naturales para la estabilización en construcción en tierra, como son algas marinas y residuos de beterraga y tomate que contienen almidón, goma y pectinas señalan que éstos mejoran el comportamiento ante la humedad y también mejora la resistencia mecánica. Se modifica la distribución de poros, reduciendo la porosidad por lo que muestra mayor resistencia ante la humedad; además, mejoró la resistencia a compresión en un 75%. Por otro lado, en estudios realizados por Aguilar et al [75] se utilizó quitosana en la mezcla con el objetivo de ser utilizado como recubrimiento externo; sus resultados indicaron que mejora la resistencia a la humedad y las propiedades mecánicas; se evaluó mediante el ángulo de contacto y erosión para la resistencia a la humedad y mediante ensayos de compresión y tracción para la resistencia mecánica.

Mediante estudios de reología de la viscoelasticidad de los morteros de tierra mezclados con éteres de celulosa, de guar y de almidón de Cappellari et al [76], muestran que al mezclar los dos primeros éteres disminuyen la respuesta gelificante de los morteros. Mientras que el éter de almidón aumenta su característica de gel, esto indica la diferencia de la organización dentro de la solución de poro y las interacciones con las partículas minerales. Las propiedades reológicas se discuten en relación a la retención de agua, y se muestra que la relación entre la disipación y elasticidad se correlacionan con la retención de agua. En tanto hay mayor introducción de la disipación viscosa, hay mayor aumento de la capacidad de retención de agua. También la retención de agua se relaciona con la incorporación de aire, que indica que la propiedad tensoactiva de la mezcla es un factor que contribuye. Además, estudios realizado por Alrashdi [77] mencionan que el mucílago de nopal mejora la absorción de agua; lo que es útil en la agricultura y el buen uso del agua.

Existen estudios sobre diversos polisacáridos que tienen propiedades de estabilización de tierra o suelos contra la erosión, como es el caso de la chía (*Salvia hispánica L.*) [78]; o ensayos de compresión en tapial estabilizado con sangre de animales que mejora la resistencia en 36% [79]. También existen investigaciones relacionadas a la humedad como factor de deterioro en las edificaciones de tierra dirigidas a propiedades como hidrofobia, estabilidad ante condiciones de humedad o interacciones de cationes. Para ello se estudió el uso de estabilizadores como estiércol de vaca, caseína, quitosana, almidón, goma guar, lignina, taninos, alginatos, agar, carragenina, etc., además el uso de microbios como la goma de xantán y gellan [80]. Esta

literatura respalda el gran interés que existe actualmente relacionado con la búsqueda de biopolímeros en el campo de la construcción.

1.4.2. Bioplásticos

Actualmente se vienen utilizando recubrimientos celulósicos y cerosos para alimentos frescos y perecederos, las películas y recubrimientos comestibles se han propuesto como soluciones eficaces para evitar el deterioro de los alimentos. Los bioplásticos en forma de films o películas son capas poliméricas delgadas formadas por un proceso seco, como la extrusión, o húmedo como es la fundición, que se usan como envoltorios para los alimentos. Consisten en una matriz polimérica aplicada directamente sobre la superficie del alimento o entre sus constituyentes por inmersión, rociado o electro-rociado y seguido del secado.

Los alimentos procesados y los no procesados están sujetos a deterioros físicos y contaminación microbiana resultante del crecimiento bacteriano o fúngico producido por factores como la humedad, el oxígeno, las fuentes de carbono, etc. El oscurecimiento es otro de los mayores problemas debido al daño físico por corte o abrasión y se atribuye a la inestabilidad de los compuestos fenólicos o a la actividad enzimática como la oxidasa y la peroxidasa [81]. Además, el deterioro puede ser inducido por el reflejo de la luz en la superficie del alimento.

Films

Actualmente, los estudios están enfocados en el desarrollo de materiales compuestos usando biopolímeros como pueden ser ulvan, carragenina, mucílago de cactus, aditivos y otros polímeros biodegradables para lograr cumplir con características mecánicas y de barrera satisfactorias para su uso propuesto [30]. A continuación, se muestran diversos estudios realizados con mucílago de cactus y otros biopolímeros para la obtención de films.

Espino-Díaz et al [82] desarrolló películas de mucílago de *opuntia ficus indica* al 4% en presencia de glicerol con y sin calcio. Este estudio mostró que con pH 3 la película era muy elástica y difícil de manejar; entre pH 4 y pH 8, los films fueron lo suficientemente fuertes para manejarlos y caracterizarlos. El color del film fue afectado por el pH y el contenido de calcio.

Gheribi et al [83] desarrolló films comestibles de mucílago *opuntia ficus indica* al 4% e investigó el efecto de varios plastificantes como glicerol, sorbitol, PEG 220 y PEG 400. Ver Figura 7. Obtuvo que los films plastificados con glicerol presentaron mejor flexibilidad, Tg menor y más alta permeabilidad que los polioles. También concluyó que los films donde se usó sorbitol muestran menor estabilidad térmica, mejor resistencia de barrera al vapor de agua y esfuerzo de tensión

que en los que se utilizó glicerol y PEG, mientras que el polietileno-glicol (PEG 400) mostraron la mayor temperatura de transición vítrea (49 °C) y estabilidad térmica (hasta 171°C).

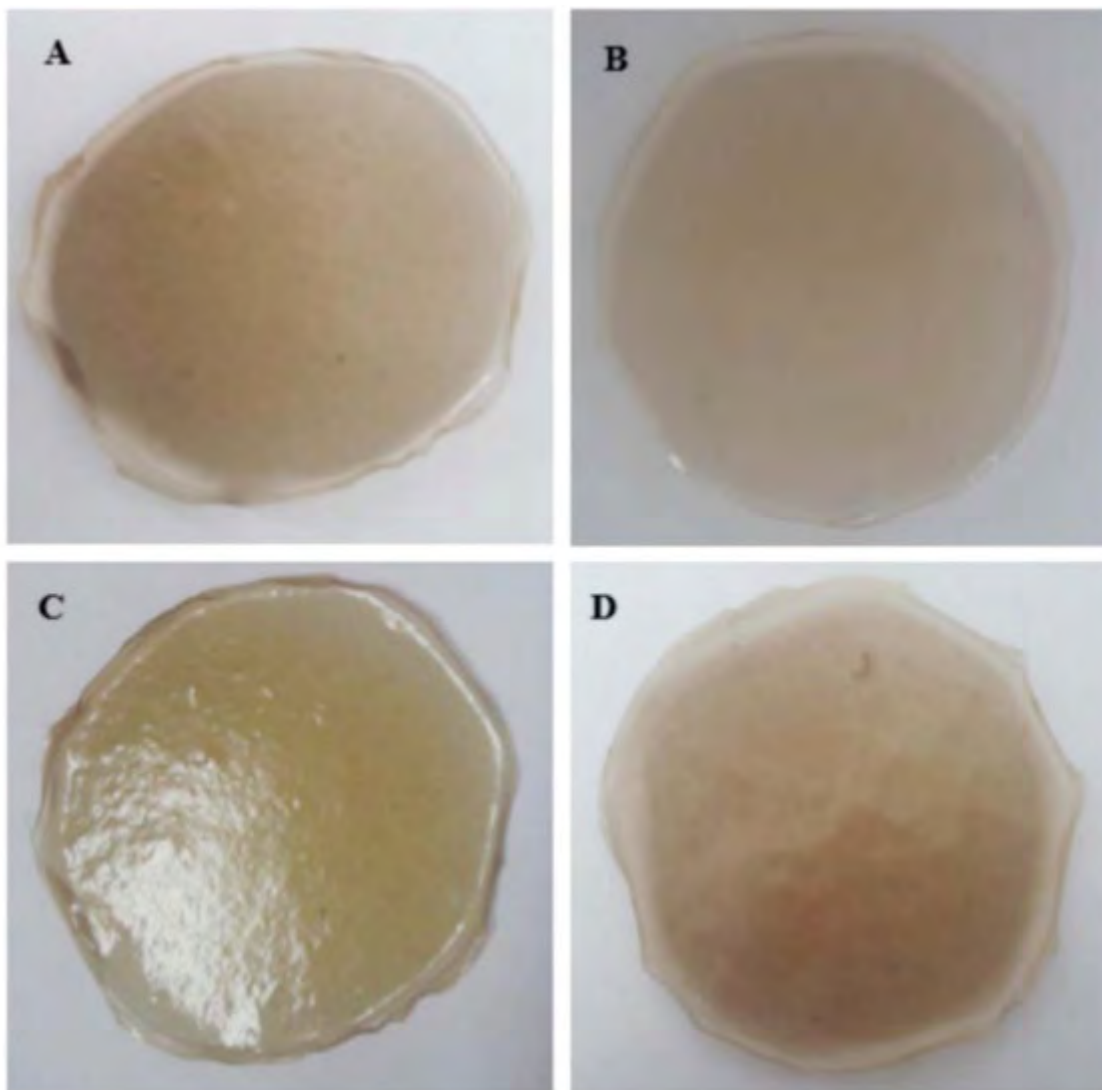


Figura 7. Films de mucílago de cactus plastificado con glicerol (A), sorbitol (B), PEG 200 (C) y PEG 400 (D). Tomado de [83].

Lira-Vargas et al [84] desarrolló films plastificados con glicerol basados en mucílago de *opuntia ficus indica* con dos variedades distintas: *opuntia* variedad Milpa Alta y Toluca. Asimismo, se fabricaron mezclas de mucílago con gelatina y mucílago, gelatina y cera de abeja. La adición de la gelatina no afectó el espesor, transparencia, sin embargo, sí modificó la morfología microscópica, la resistencia mecánica y propiedades de barrera a los gases y al vapor de agua. La adición de la cera de abeja promovió la formación de agregados en la morfología microscópica y adquieren menor espesor, mayor resistencia a tracción, mejores propiedades de barrera, aunque son menos transparentes. Asimismo, la variedad del *opuntia* hizo diferencia, pues la de Milpa Alta formó films más delgados, más transparentes y mayor resistencia a tracción que en

de Toluca, por lo que se infiere que el lugar de origen del cactus estaría influyendo. Las propiedades mecánicas y de barreras siguen siendo bajas.

También el uso de PVA y mucílago *opuntia ficus indica* [26] dio buenos resultados en cuanto a las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y de barrera de los films de mucílago. La proporción 80:20 (mucílago/PVA) fue la que dio el resultado óptimo; se incrementó en las propiedades de esfuerzo a tensión, elongación a rotura y el ángulo de contacto con el agua respecto de las otras proporciones (100:0, 90:10, 70:30, 60:40, 0:100). Dominguez-Martinez et al [85] estudió las propiedades de films de quitosano, PVA, glicerol y mucílago de cactus (*O. tormentosa*) a distintas concentraciones; resultaron films estables y homogéneos. El mucílago generó films más hidrofílicos, con alta permeabilidad de vapor agua, en comparación con los films de PVA y quitosano.

Guadarrama-Lezama et al [86] evaluó el efecto de la adición de mucílago de *opuntia ficus indica* para la formación de films de pectina cítrica. Se realizaron estudios a diferentes concentraciones y concluyó que en concentraciones de 20% de mucílago se produce el aumento de la temperatura de degradación y disminuyó la permeabilidad al vapor de agua. Además, con concentraciones de mucílago menores al 12% se muestra una mejor integración de los componentes; y se observó que hay interacción entre grupos funcionales del mucílago y la pectina.

Scognamiglio et al [87] elaboró films de almidón y fibras de *opuntia ficus indica*; los resultados indican que las fibras mejoran el comportamiento del film de almidón, dado que aportó plasticidad respecto de los films sin mucílago. Sin embargo, el comportamiento mecánico no fue del todo satisfactorio, pues esperaban que el efecto de las sales de calcio y magnesio contenidas en la fibra mejorara la rigidez; pero no ocurrió.

López-García et al [88] comparó en las mezclas de almidón de maíz/PVA/mucílago/quitosano/glicerol, variando la incorporación directa del mucílago de *opuntia joconostle* versus el extracto del mucílago y se estudió la diferencia en sus propiedades térmicas, mecánicas y químicas. Se observó que la adición directa del mucílago ocasionó separaciones de microfases en el film mientras que los films con el mucílago extraído no se ven las agregaciones o las separaciones de microfases. Las propiedades mecánicas de los films del mucílago que fue agregado directamente presentaron valores ligeramente menores respecto a los films con mucílago extraído. Asimismo, Oliveira et al [89] evaluó el mucílago de las hojas de *Pereskia aculeata* para desarrollar films comestibles plastificados con glicerol; se obtuvo films flexibles y cohesivos, con una superficie suave y buena estabilidad térmica; y dado que los films no son

tóxicos y no son transparentes y pueden ser utilizados como recubrimiento primario de productos alimenticios sensibles a la luz.

Según las referencias, se lograron fabricar films de mucílago de cactus a concentraciones relativamente altas de mucílago (>4%) y/o en mezclas con otros materiales. Son particularmente interesantes por su flexibilidad, propiedades de barrera y estabilidad térmica; sin embargo, se deberá investigar para mejorar su resistencia mecánica y la alta afinidad al agua, características que está relacionadas a su composición de polisacárido y su estructura, que es altamente ramificada y rica en grupos hidrofílicos.

Recubrimientos

Los recubrimientos son materiales de empaque primario para preservar alimentos y extender su duración, previniendo el deterioro de la calidad física y nutricional de los productos. Además, debe preservar las propiedades sensoriales y organolépticas, lo que determina la apreciación final por parte del consumidor. También existen estudios sobre el uso del mucílago de cactus como cobertura, particularmente para frutas altamente perecibles, productos mínimamente procesados y en cortes o en tajadas. La inmersión es el proceso más utilizado para recubrimientos basados en mucílago de cactus, y consiste en sumergir el producto en una solución que forma film compuesto por la matriz polimérica y aditivos.

Del Valle et al [90] estudió el mucílago de *opuntia ficus indica* como cobertura de fresas con el objetivo de extender su vida útil, los resultados mostraron mayor firmeza en las fresas recubiertas en comparación con las que no, lo que indica que se mejoró su resistencia al daño mecánico durante su almacenamiento reduciendo, de ese modo pérdidas económicas.

Oluwaseun et al [91] investigó el mucílago de *opuntia ficus indica* para recubrir papaya y los resultados muestran que el recubrimiento afectó su atmósfera interna y retrasó su maduración durante el almacenamiento a temperatura ambiente. Además, redujo a la mitad el recuento de levaduras y de moho en la fruta; el recuento de bacterias aeróbicas psicotrópicas y mesofílicas se redujo de 11 a 4-6 CFU/g y de 9 a 4-6 CFU/g respectivamente. Los estudios, aún no han establecido la actividad antimicrobiana del mucílago de cactus. Además, estudió el potencial del mucílago de cactus de ser una barrera efectiva contra el intercambio de gases entre el medio ambiente y la fruta recubierta reduciendo la permeabilidad al O₂ y promoviendo la acumulación de CO₂ en la atmósfera alrededor de la fruta.

Trevino-Garza et al [92] demostró que el recubrimiento de mucilago de *opuntia ficus indica* y quitosana en piña fresca cortada reduce significativamente las levaduras y moho, respecto de la

piña sin recubrir (de 6.6 CFU/g a 3-5 CFU/g) el total de recuento de aeróbicos, de 4.7 CFU/g a 3.6-4 CFU/g y de psicotrópicos, de 4.1 CFU/g a 2.4-3.8 CFU/g en almacenamiento a 4°C. El recubrimiento aplicado, reduce el recuento de *Listeria monocytogenes* y *Salmonella typhi*. Los autores atribuyen la reducción del crecimiento microbiano al efecto antimicrobial del quitosano y a la baja temperatura de almacenaje (4°C), la apariencia se puede ver en la Figura 8. Allegra et al [93] reportó que durante el periodo de almacenamiento de 14 días a 4°C, el recubrimiento basado en mucílago de *opuntia ficus indica* fue efectivo manteniendo su peso, aspecto, firmeza y el contenido de carotenoide; además los higos recubiertos mostraron menor crecimiento de *Enterobacteriaceae* comparado con los higos sin recubrir.

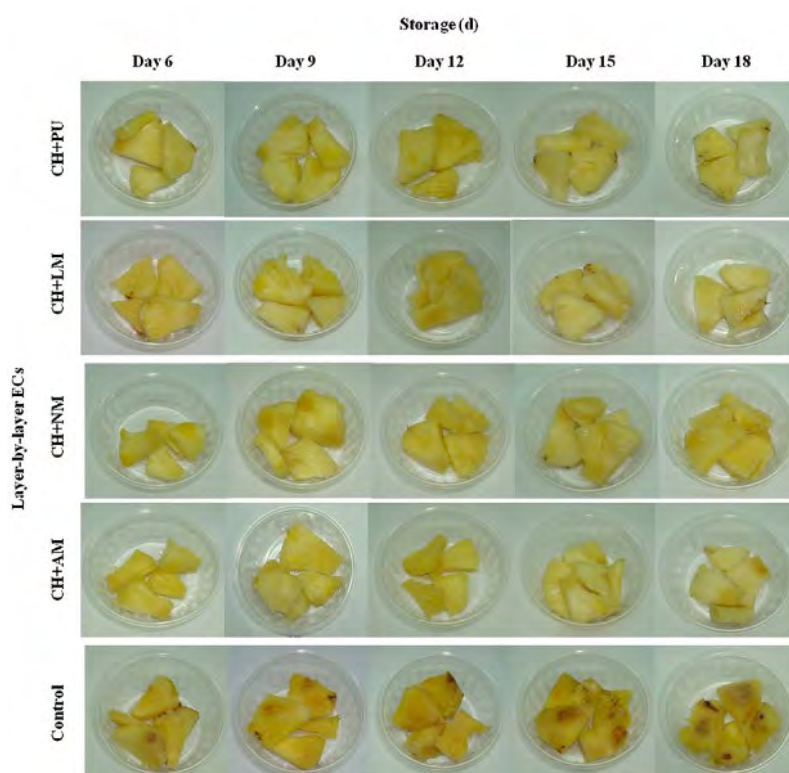


Figura 8. Efecto del recubrimiento en la apariencia de la piña cortada a 6,9,12, 15 y 18 días, reportado por Treviño-Garza et al [92]. La fila CH-NM corresponde al recubrimiento de quitosano y mucílago de cactus.

También, Treviño-Garza et al [92] usó inmersión por capas, que consistió en sumergir cubos de piña alternando mucílago de *opuntia ficus indica* y solución de quitosana. El recubrimiento logró disminuir la transmisión de vapor de agua y pérdida de peso en casi 10%. El efecto barrera se produce debido a la gran capacidad de retener agua de la cobertura; los frutos recubiertos presentaron mayor firmeza que los frutos sin recubrir en 18 días de almacenamiento a 4°C. El autor sostiene que el mucílago entrecruzado con quitosana actúa como una efectiva barrera

física y mecánica reduciendo la pérdida de jugo y retrasando las reacciones del metabolismo respiratorio.

Zegbe et al [94] elaboró films de mucílago de *opuntia ficus indica* con y sin plastificantes como son el glicerol y polietileno glicol (PEG) y los usó para recubrir frutos del paca. El método usado fue efectivo para mantener el color, firmeza, sólidos solubles y concentraciones de la materia seca durante el almacenamiento llevada a cabo a temperatura ambiente.

Bernardino-Nicanor et al [95] estudió la diferencia en la morfología del mucílago de *Opuntia robusta* cuando este es extraído del tejido parenquimático o colenquimático; mediante FTIR observó que el primero tiene mayor cantidad de sustancias pécticas que el segundo. Además, utilizó el brochado para aplicar el mucílago en solución de como cobertura en tomates. Los resultados, dieron que el sistema de aplicación y el mucílago fueron efectivos para mantener firme y reducir la pérdida de peso en tomates. El licopeno, que le da el color a los tomates, se mantuvo más alto en los tomates sin recubrir.

Recientemente, Morais et al [81] , mezcló el mucílago de *nopalea cochenillifera* con almidón de yuca para cubrir rodajas de ñame (*Dioscorea* spp.) que estaba mínimamente procesado. El ñame recubierto con mucílago mostró baja pérdida de peso respecto del recubierto con mezcla de almidón y mucílago. Se destacó el efecto del recubrimiento con mucílago en el aumento de contenido de polifenoles que se sintetizó como un mecanismo de defensa contra las reacciones de oscurecimiento que ocurre en el ñame mínimamente procesado, ver Figura 9.

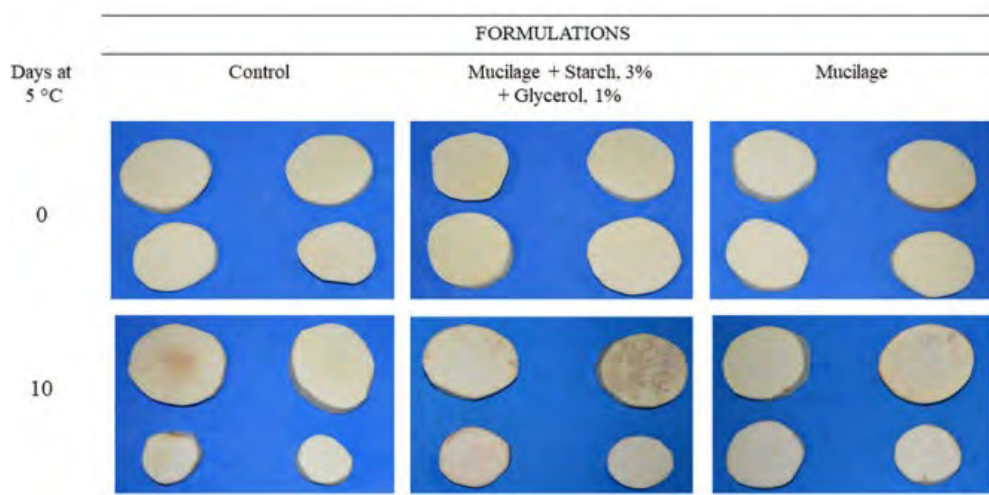


Figura 9. Rodajas de *Dioscorea* spp. con recubrimiento de tres formulaciones: de control, recubierto con mucílago, almidón y glicerol y recubierto con solo mucílago. Tomado de [81].

También, el mucílago de la especie *Opuntia elatior* Mill al 10% y 20% w/v, se adicionó glicerol (5%) como plastificante, ácido cítrico (0.75%) como preservante y Tween 80 (0.5%) como surfactante ; esta mezcla fue utilizada para recubrir piña en trozos; el tratamiento afectó positivamente la firmeza, la acidez total titulable, los sólidos solubles, ácido ascórbico y sus atributos sensoriales [96].

Independientemente de su especie del mucílago de cactus, método de extracción y aplicación, se observa una tendencia a un comportamiento eficaz para prolongar la vida útil de los productos alimenticios y preservar sus atributos cualitativos. Literatura sobre films y recubrimientos se puede ver en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Investigaciones sobre elaboración de films basados en mucílago de cactus. Tabla de Gheribi & Khwaldia [30] traducida al español.

Descripción	Extracción del mucílago	Condiciones de formación del film	Principales propiedades	Referencia
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i> + PVA)	Prensado de las pencas, filtrado, precipitación con etanol y secado (50°C, 24h)	Mucílago/PVA (90:10, 80:20, 70:30 y 60:40) PEG 200 30% Moldeado en plato Petri de plástico Secado a 50°C por 48 h Almacenado a 53% RH y 25°C	Espesores 0.16 -0.19mm WVP 35-474g mm/m ² TS 2-6 MPa EB50-60% WCA 90°-115° Tg 39 - 60°C Tm 198 – 213 °C	[26]
Mucílago (cáscara de los frutos de <i>Opuntia ficus indica</i>)	Prensado de las pencas, filtrado, precipitación con etanol y secado (50°C, 24h)	Mucílago 4% wt/wt Glicerol 40% Moldeado en plato Petri de plástico Secado a 40°C por 48 h Almacenado a 53% RH y 25°C	Espesores 0.17mm WVP 53 g mm/m ² d kPa TS ~1 MPa EB ~ 66% WCA ~ 91° Tg 41°C	[97]
Mucílago (hojas de <i>Pereskia aculeata</i> Miller)	Homogenización con agua en una trituradora, filtración, centrifugado, precipitación y secado en frío	Mucílago 1.5-2% Glicerol 20-25%	TS 1.2 – 5.5 MPa EB 22%-46% YB 5.4–69 MPa	[89]
Pectina cítrica + mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>)	Inmersión en solución de CaCl ₂ por 24 h, filtrado y almacenado a 4°C	Pectina cítrica 2 g/100mL de agua Mucílago de cactus 5, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 g/100g de agua Glicerol 5 mL Moldeado en platos acrílicos Secado a 50°C toda la noche Almacenado a 52% RH y 25°C	WVP 1.5–1.7 × 10 ⁻⁹ g/m d Pa TS 0.5–0.8 MPa YM 0.9–1.7 MPa EB 25%–41% Tm 209–310 °C	[86]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + plastificantes (glicerol, sorbitol, PEG 200 y PEG 400)	Prensado de las pencas, filtrado, precipitación con etanol y secado (50°C, 24h)	Mucílago 4%, plastificante 40% Moldeado en plato Petri de plástico Secado a 40°C por 48 h Almacenado a 53% RH y 25°C, 48 h	Espesor ~0.2 mm WVP 22–64 g mm/m ² d kPa TS 1–2.5 MPa EB 50%–65% WCA 85° Tg 30–50 °C	[83]
Almidón + PVA + mucílago (<i>Opuntia joconsotle</i>) + chitosana + glicerol	Mucílago directo: triturado, filtrado, centrifugado. Mucílago extraído: precipitación con etanol, pH ajustado a 3.5 con HCl	Mucílago 2.5 – 27% PVA 11-14% Chitosan 11-16% Almidón 27-36% Glicerol 22-30% Moldeado en plato Petri de plástico Secado a 35°C por 48 h	YM ~0.2 GPa H 19–22 MPa	[88]

		Almacenado en bolsas de polietileno en un desecador a 22°C		
PVA + chitosana + mucílago (<i>Opuntia tormentosa</i>)	Mezclado enlicuadora, centrifugado, precipitado con etanol	Mucílago 10% PVA 8%, 23%, 38%, 53% y 68% Chitosan 8%, 23%, 38%, 53% y 68% Glicerol 14% Moldeado en plato de vidrio Secado con un deshidratador convectivo a 40°C por 4 h	Espesor 0.05–0.07 mm WVP 3066–852 mL/mm ² d Pa TS 30–50 MPa EB 10–70%	[85]
Mucílago (frutos del <i>Cereus hildmannianus</i>)	Extracción en agua a 60°C, filtrado, centrifugado, precipitado con etano, lavado con acetona y secado (40°C, 24h)	Mucílago 1% Glicerol 1%-4% Moldeado en plato de Teflón Secado a 23°C por 48 h Almacenado a 55% RH y 23°C	Espesor 0.1–0.17 mm WVP 0.32–1.1 g mm/m ² h kPa TS 3–28 MPa EB 0.4–19% YM 40-2359 MPa WCA 75°–108°	[98]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + gelatina + cera de abeja	Mezclado con agua a 90°C, decantado, centrifugado, precipitado con etanol, dializado y secado en frío	Mucílago 0.5% (30°C) Gelatina 0.25-0.5% (60°C) Cera de abeja 0.25-0.5% (60°C) Glicerol 0.6%, Tween 80 0.4% Moldeado y secado a 24°C a 50% RH por 1-3 días	Espesores 0.02–0.04 mm WVP 13–116 × 10 ⁻¹² mol m/s m ² Pa O ₂ P 3–14 × 10 ⁻¹² mol m/s m ² Pa CO ₂ P 3–9 × 10 ⁻¹² mol m/s m ² Pa TS 0.5–2.7 MPa	[84]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + glicerol+CaCl ₂	Aplastado, homogeneización en agua a 85°C, filtrado, centrifugado, precipitado con etanol, lavado con etanol y secado en frío	Mucílago 4%, glicerol 50%, CaCl ₂ 30% pH (3, 4, 5, 6, 7 y 8) RH 30%, 25°C Moldeado en plato Petri de vidrio recubierto con Teflón Secado a temperatura ambiente por 24h Almacenado a 50% RH y 25°C	Espesores 0.109–0.131 mm WVP 98–147 g mm/m ² d kPa TS 0.3–0.95 MPa EB 15–24%	[82]

WVP: Permeabilidad al vapor de agua. O₂P: Permeabilidad al oxígeno. CO₂P: Permeabilidad al dióxido de carbono
TS: Resistencia a tracción. EB: Elongación a la rotura. YM: Módulo de Young. H: Dureza. WCA: Ángulo de contacto del agua. Tg: Temperatura de transición vítrea. Tm: Temperatura de fusión. PVA: Acetato de Polivinilo. RH: Humedad relativa. PEG: Polietilenglicol

Tabla 3. Investigaciones sobre recubrimientos basados en mucílago de cactus. Tabla traducida de Gheribi & Khwaldia [30]

Descripción	Extracción del mucílago	Cobertura	Métodos y condiciones de cobertura	Principales efectos	Referencia
Mucílago (pencas de cactus sin espinas) + almidón de yuca + glicerol	Inmersión en una solución que contiene 5mg/L de ácido cítrico	Yuca mínimamente procesada (<i>Dioscorea spp.</i>)	Inmersión Almacenamiento en empaques de Nylon por 10 días a 5°C	Se redujo la pérdida de masa fresca Se mantuvo la calidad visual y sensorial Se incrementaron los componentes fenólicos	[81]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i> + <i>Aloe debrana</i>)	Las pencas fueron prensadas y tamizadas	Mango (<i>Mangifera indica L.</i>)	Inmersión	Se enlenteció el deterioro de la calidad Se mantuvo la buena apariencia El contenido de sólidos solubles se mantuvo después de 16 días de almacenamiento Las propiedades organolépticas de las frutas recubiertas con el mucílago fueron mejores que la fruta	[99]

				de control y la recubierta con gel de aloe	
Mucílago (pencas de <i>Opuntia elatior</i> Mill.)	-	Guava (<i>Psidium guajava</i> L.)	Inmersión Almacenamiento a 10°C por 4-16 días	Reducción de la pérdida de peso y firmeza	[96]
Mucílago (tejido parenquimatoso y colenquimatoso de <i>O. Robusta</i>)	Extracción con agua o etanol del parénquima o colénquima (mezcla a alta velocidad), filtrado y secado	Tomates (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Cepillado (3 veces) Almacenamiento a 20°C	Mejoramiento de las firmeza Reducción de la pérdida de peso Enlenteció la maduración de la fruta durante el almacenamiento	[95]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + glicerol	Triturado de pencas, homogenización en agua, filtrado, precipitado con etanol, secado	Higo (<i>Ficus carica</i> L.) fruit	Inmersión Almacenamiento en refrigerador a 4°C y 85% RH por 14 días	Decreció la pérdida de peso Se extendió la duración del higo en los anaqueles Se mantuvo el brillo la apariencia visual y la firmeza Reducción de la densidad de células microbianas Reducción del conteo de Enterobacterias Atenuó el decremento del contenido de aminoácidos e incrementó la cantidad de carbohidratos y otros metabolitos clave	[94][100]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + glicerol + chitosana	Licudo de pencas, homogenización en agua, centrifugado, precipitado con etanol, secado	Piña fresca cortada (<i>Ananas comosus</i>)	Inmersión usando proceso de capa por capa Almacenamiento en contenedores de plástico a 4°C por 18 días	Se redujo la pérdida de peso y ablandamiento de las frutas Se preservaron el color, el olor, el sabor y la textura La aceptación sensorial fue extendida por 6 días en comparación con el control	[92]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + glicerol/tween 20	Triturado de pencas, homogenización en agua, filtrado, precipitado con etanol, secado	Kiwi fresco en rodajas (<i>Actinidia deliciosa</i>)	Inmersión Almacenamiento sellado en empaques de polietileno tereftalato 5°C y 90% RH por 12 días	Se mantuvo la firmeza tanto como el contenido de ácido ascórbico y pectina Se preservó la calidad visual y el sabor	[28]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + glicerol/PEG	Homogenización en agua, filtrado, precipitado con etanol, secado	Guavas sin procesamiento (<i>Psidium Guajava</i> L.)	Frutas recubiertas con films procesados Almacenamiento por 6-8 días a 27°C y 20% RH	Se extendió la vida en el anaquel Se mantuvieron los atributos de calidad Alta firmeza Se mantuvieron los sólidos solubles y la concentración de materia seca	[94]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>)	Homogenización en agua, centrifugado	Fruta de la papaya (<i>Carica papaya</i>)	Inmersión, secado Almacenado por 6 semanas a 27°C y 55%-60% RH	Alta firmeza Se extendió la vida en el anaquel Baja carga microbiana (psicotrópico aeróbico total)	[101]
Mucílago (pencas de <i>Opuntia ficus indica</i>) + glicerol	Homogenización en agua, centrifugado	Fresa (<i>Fragaria ananassa</i>)	Inmersión, secado Almacenado por 10 días a 5°C y 75% RH	Se extendió la vida en el anaquel Mayor firmeza El recubrimiento no afectó el color Análisis sensorial reveló que los consumidores prefieren la fruta recubierta sobre la fruta no recubierta	[90]

1.5. Teoría de mezclas

Miscibilidad y compatibilidad

Los resultados de las mezclas de polímeros están estrechamente relacionados con dos características: la miscibilidad y la compatibilidad.

La miscibilidad es un concepto termodinámico relacionado con la presencia o ausencia de fases "homólogas", distinguibles física o químicamente. La miscibilidad da cuenta de una buena transferencia de esfuerzos entre componentes; un enfoque para conseguirlo es que las partes formen fases amorfas miscibles, pues los componentes se habrían mezclado a nivel molecular y no habría inconveniente en la transferencia de esfuerzos.

Las soluciones de polímeros pueden ser miscibles, inmiscibles o parcialmente miscibles y, aunque la temperatura de transición vítrea (T_g) no es una propiedad termodinámica, representa un cambio en la libertad de movimiento de los segmentos de la cadena principal de la fase amorfa de un polímero y que da como resultado, cambios significativos de las respuestas térmicas, dieléctricas y mecánicas de la muestra macroscópica. Si la mezcla es miscible, solo habrá una T_g , que será un valor intermedio de los valores de T_g de los polímeros componentes; esto evidenciará la existencia de una sola fase amorfa, única y homogénea; sin embargo, esto no asegura que la única fase amorfa homogénea sea el estado de equilibrio termodinámico. Además, uno de los componentes podría cristalizarse; por lo que el T_g estaría sujeto a una variedad de complicaciones en polímeros semicristalinos. Una prueba útil para la miscibilidad es la aparición de temperatura de solución crítica más baja (l_{cst}), donde la fase de la mezcla clara se separa a cierta temperatura y se convierte en turbio, para muchos procesos, esto se invierte al enfriarse. Ese comportamiento es una buena prueba termodinámica de que la mezcla clara original consistía en una única fase homogénea en equilibrio. Muchas veces, la miscibilidad completa no puede existir a todas las temperaturas debido a la aparición de los límites de fase; otras veces uno de los componentes o ambos se cristalizan, en este caso la fase amorfa existe como una sola fase homogénea en todo el espectro de la composición de la mezcla. La fase cristalina desaparecerá por encima del punto de fusión T_m de ese componente, y por enfriamiento a temperaturas por debajo de T_g , su reaparición puede ser parcial o totalmente suprimido por consideraciones cinéticas [102].

Si la mezcla es inmiscible, como sucede en la mayoría de mezclas físicas de diferentes pesos moleculares, habrá dos T_g , uno de cada polímero, pues los componentes de la mezcla se separan en fases que contengan predominantemente su propio tipo. Esto, combinado con fuerzas de

atracción bajas a través de los límites de fases, hace que este tipo de mezclas tengan malas propiedades mecánicas. Existen mezclas con componentes inmiscibles, que con un adecuado control de la morfología de la fase durante su procesamiento o la adición de agentes “compatibilizantes” pueden mejorar la interfaz. Si la mezcla es parcialmente inmiscible, habrá dos T_g intermedios entre los valores T_g de los polímeros puros. El factor más importante que condice a la miscibilidad en materiales de bajo peso molecular es la contribución de la entropía combinatoria, que es muy grande en comparación con los de alto peso molecular como son los polímeros. Es por ello que las mezclas solvente-solvente ofrecen un rango mucho más amplio de miscibilidad que las combinaciones polímero-solvente y en rango de miscibilidad de las mezclas entre polímeros es mucho menor aún[103].

La relación que gobierna las mezclas de componentes distintos es la ecuación termodinámica de cambio de energía de Gibbs a temperatura y presión constante (Ecuación 1):

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

ΔG_m = energía libre de mezcla.

ΔH_m = entalpía de la mezcla

ΔS_m = entropía de la mezcla.

Para que la miscibilidad ocurra, ΔG_m debe ser mayor que 0. Para componentes de peso molecular alto, como son los polímeros, el $T\Delta S_m$ es pequeño y otros factores como contribuciones de entropía no combinatoria y valores de ΔH_m dependientes de la temperatura, pueden dominar y conducir al comportamiento inverso, es decir, miscibilidad decreciente con el aumento de la temperatura. Comparando una mezcla de dos componentes de bajo peso molecular con otra de dos componentes de alto peso molecular, si en ambos casos hay el mismo número de moléculas, la diferencia estará en el número de formas en el que se pueden ordenar los componentes en la mezcla; sin embargo, las posibles combinaciones en un caso y en el otro difieren; pues existen mayores restricciones en la mezcla de alto peso molecular dado que las moléculas están conectadas y reducen enormemente el número de combinaciones posibles para su ordenamiento. Es por ello que la entropía combinatoria (ΔS_m) será pequeña y esto corresponderá a que ΔG_m se acerque a cero, lo que significa menor miscibilidad. Para polímeros con pesos moleculares muy altos, la entropía combinatoria (ΔS_m) tenderá a cero.

Diagrama de Fase

Los polímeros con pesos moleculares altos presentan temperatura de solución críticas bajas (lcst por sus siglas en inglés). Se puede ver la comparación con las mezclas líquido- líquido y polímero- solvente que presentan temperatura de solución críticas altas (ucst por sus siglas en inglés). Ese comportamiento se muestra en el diagrama de fase de la Figura 10.

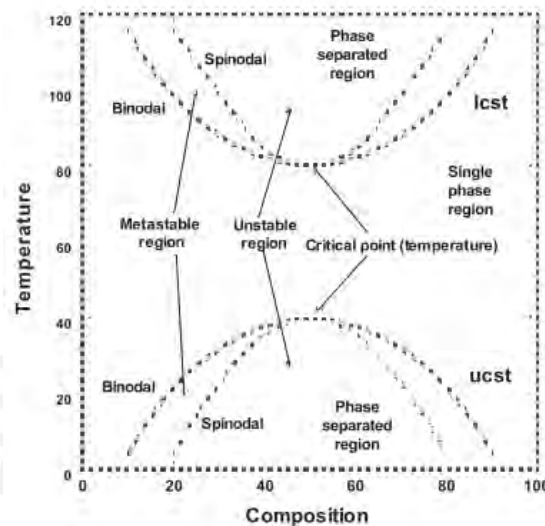


Figura 10. Diagrama de fase, que muestra el comportamiento de lcst y ucst para mezclas de polímeros. Tomado de [103].

Compatibilidad

La compatibilidad, está determinada por parámetros termodinámicos y parámetros químicos; un indicador es que las propiedades de la mezcla sean mejores a las propiedades de los polímeros puros; sin embargo, no es común que en las mezclas todas las propiedades sean mejoradas, como la resistencia mecánica, óptica, resistencia química o procesamiento.

Los factores que influyen en la compatibilidad de las mezclas tienen que ver con la naturaleza de los polímeros que se van a mezclar, como es la estructura química, los pesos moleculares, el estado de la agregación (o integración, por ejemplo: amorfo vs semi cristalino); también la composición de la mezcla; la morfología de fase; la adhesión entre las fases, que puede ser propia de los polímeros que se mezclan o propiciada por un compatibilizador. También influyen los factores externos a los polímeros que se mezclan, como la temperatura; la presencia de otros aditivos, etc.

CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Listado de equipos y reactivos

Equipos

- FTIR: Spectrum Two FT-IR, Perkin Elmer
- DSC: DSC-4000. Perkin Elmer
- TGA: TGA-4000. Perkin Elmer
- Reómetro: Discovery Hybrid Rheometer HR1. TA Instruments.
- AFM: AFM Nanosurf Easyscan 2.
- Equipo de tracción: Mark-10 M4-20. Software Mesure® Lite.
- Micrómetro Gensize 0-25mm – 0.01mm
- Microscopio digital Dinolite Premier, modelo FC-Z-OC2.
- Triturador. National Juicer blender (600 W)
- Centrifugadora XIANGZHI Centrifuge XZ-20T
- Horno VWR International. Modelo 1510E-2
- Agitador magnético, marca ISOLAB

Reactivos

- Alcohol Isopropílico (2 – Propanol \geq 99.5%). Marca: BAKER ANALYZED® ACS, J.T. Baker®.
- Etanol (\geq 99.5%). Marca: BAKER HPLC ANALYZED® ACS, J. T. Baker®.
- Hidróxido de Sodio (NaOH). (36.5 a 38%) Marca: J. T BAKER
- Glicerol – para biología molecular (\geq 99.5%). Sigma-Aldrich.

2.2 Descripción de muestras de *E. pachanoi*

Los tallos del cactus *E. pachanoi* fueron recolectados de plantas de aproximadamente 1 año de edad de jardines de la ciudad de Lima, Perú. En la Figura 11 se muestra una rama de cactus representativa.

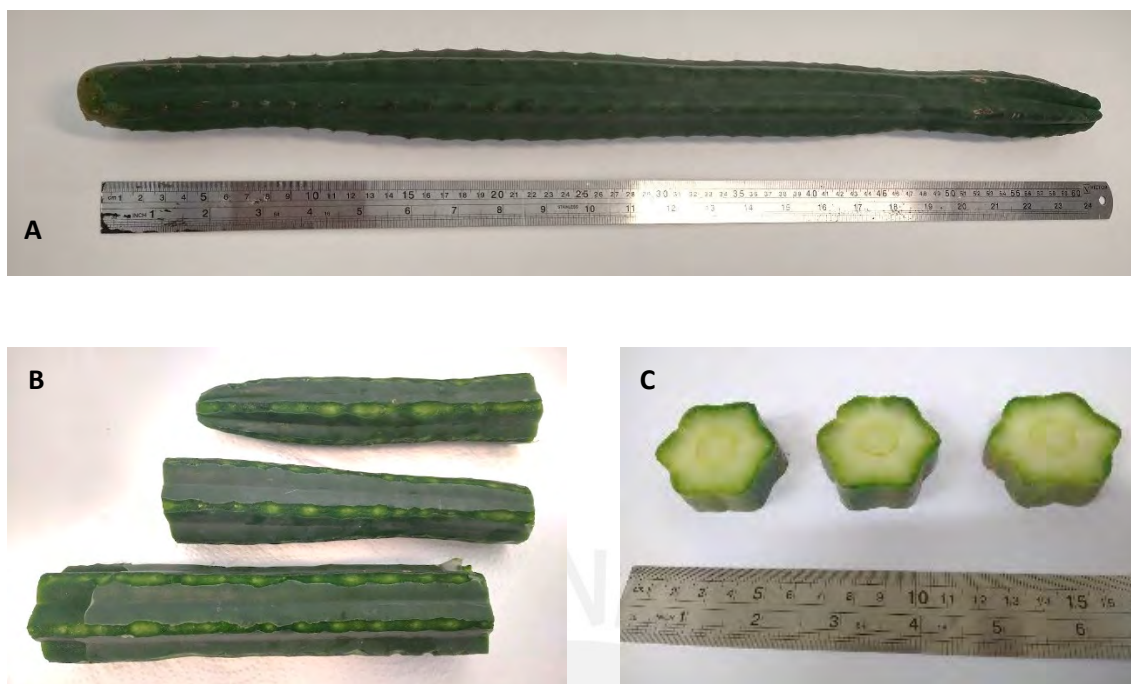


Figura 11. Imágenes representativas del cactus *E. pachanoi*, de 5 cm de diámetro y 60 cm de longitud. A. Especimen de *E. pachanoi*. B. Trozado del cactus y retiro de espinas. C. Secciones transversales del cactus.

2.3 Obtención de polvo de mucílago del cactus *E. pachanoi*

Se tomó como referencia el procedimiento realizado por Sepúlveda et al [15] con modificaciones para la obtención del polvo de mucílago.

Pre-tratamiento

Se lavaron las ramas del cactus para quitar tierra y otros contaminantes; luego se pesaron y se midieron sus dimensiones (largo y diámetro). Después, se retiró la capa más superficial de las ramas y también las espinas.

Extracción

Se cortaron las ramas en trozos y se trituraron sin agua con un extractor; se obtuvo una parte líquida (mucílago) y una masa sólida.

Separación sólidos y líquidos

Se separaron el líquido y los sólidos obtenidos de la trituración en el extractor.

Macerado

Los restos sólidos que se obtuvieron de la trituración, se mezclaron con agua destilada durante 48 horas en proporción 2:1 agua destilada:sólidos v/v. Se incluyó el macerado debido a que

diversos autores lo reportan con el objetivo de ayudar a extraer los biopolímeros acuosos [17][36][87].

Filtración y concentración

En el caso de los restos sólidos macerados, se filtraron para retirar la parte más gruesa y se llevó al calor a 80°C con agitación constante, con fin de que el agua evapore, hasta que el volumen reduzca a la tercera parte.

Centrifugación

La parte líquida obtenida del extractor y la obtenida luego de la filtración y concentración de la masa sólida se centrifugó a 7000 RPM durante 10 minutos y se separó el líquido sobrenadante.

Precipitación

El líquido sobrenadante se precipitó en alcohol isopropílico en una proporción de 2:1 alcohol/mucílago, v:v por 12 horas bajo refrigeración. Se observó la formación del precipitado.

Secado y pulverizado

Se separó el material precipitado y se llevó al horno a 40°C por 48 horas; con lo que se obtuvo el material seco. Finalmente, el material seco se molió mediante un mortero de convertirlo en polvo.

En las Figuras 12 y 13 se pueden observar el diagrama del proceso de extracción del mucílago y los productos obtenidos.

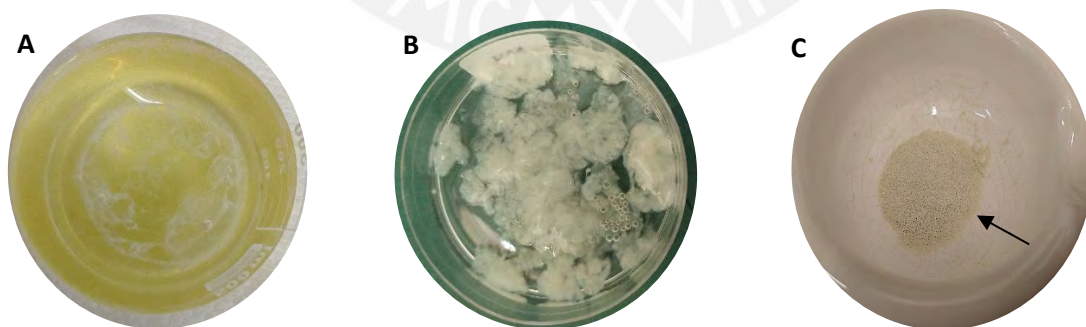


Figura 12. Imágenes representativas de los productos obtenidos durante el proceso de extracción de polvo de mucílago. A. precipitado del mucílago en alcohol isopropílico. B. recuperación del precipitado. C. polvo de mucílago seco y molido.

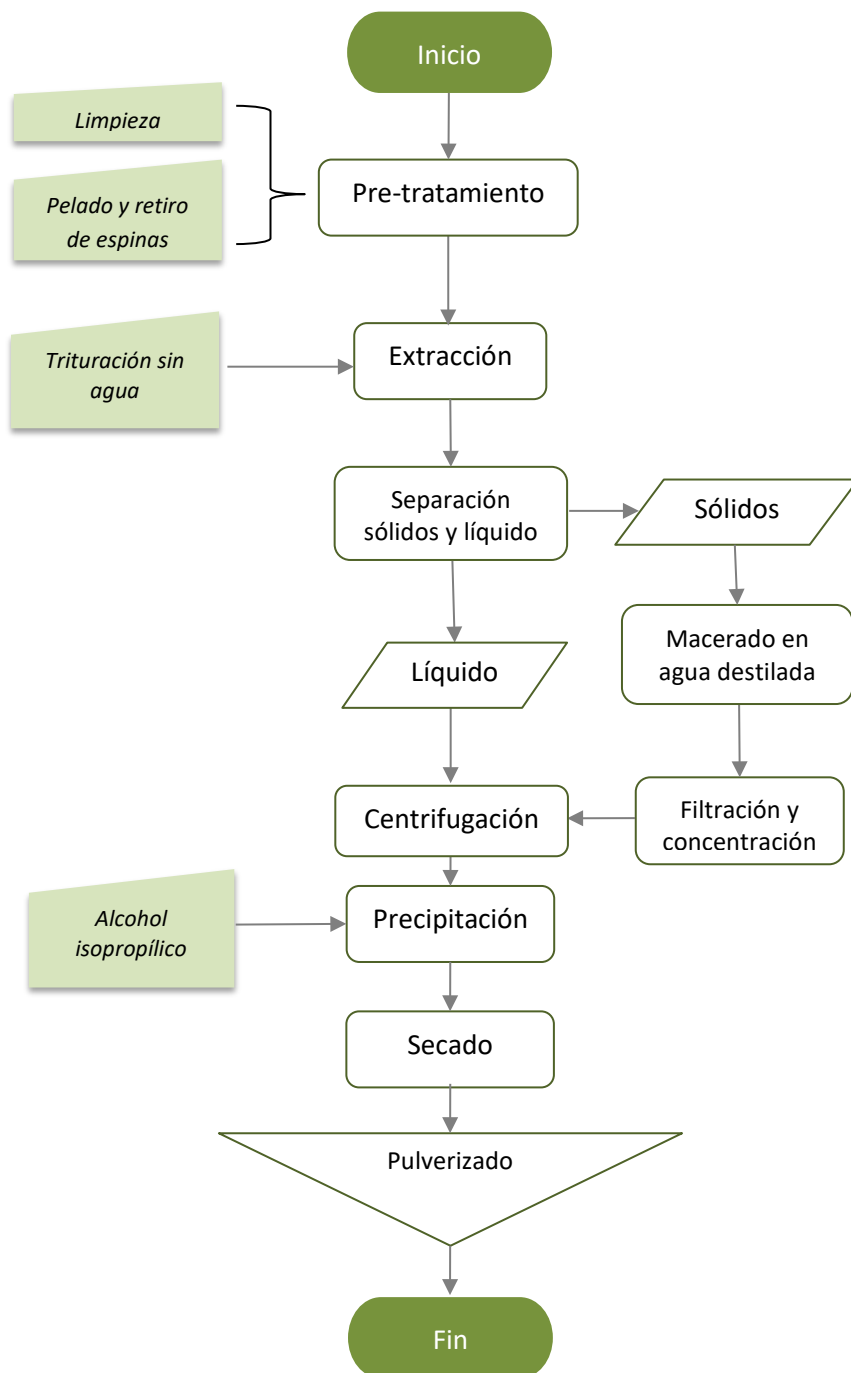


Figura 13. Diagrama del proceso de extracción de polvo de mucílago de *E. pachanoi*

2.4 Obtención de ulvan y carragenina a partir de algas del litoral peruano

Los procesos de extracción de los polisacáridos tanto del ulvan como de la carragenina son parte del trabajo de investigación que se realiza en el laboratorio de Biopolímeros y Bionanomateriales de la PUCP y se describe a continuación.

Ulvan

El ulvan en polvo utilizado para el presente trabajo fue extraído de la especie comercial *Ulva nematoidea*, que es abundante en el mar del Perú. Ver Figura 14.



Figura 14. Alga de la especie *Ulva nematoidea*.

Pretratamiento

Se realizó la limpieza del alga y lavado varias veces con agua destilada para retirar los elementos contaminantes que pudieran estar adheridos y también para eliminar la sal marina. Luego se secó en un horno a 40°C durante 24 horas; después se lavó con etanol en la proporción 34.4 g por 500ml de etanol. Se volvió a colocar el alga en el horno a 40°C durante 24 horas.

Extracción

El método realizado es la extracción acuosa a pH 7 en caliente. Por cada 34.4 g de algas verdes pretratadas se agregó 1200 ml de agua destilada; la reacción se llevó a cabo bajo agitación constante a una velocidad de 300 rpm, a una temperatura de 80 °C, durante 6 horas.

Filtración y centrifugación

Se filtró el material obtenido en el paso anterior (ver Figura 15a), se separaron los restos de mayor proporción y luego se procedió a centrifugar el líquido con el objetivo de retirar los sólidos dispersos en el medio acuoso. En la fase de centrifugado se controló la velocidad de centrifugación a 10,000 rpm por 10 minutos.

Concentración

Con el objetivo de disminuir el volumen de la fase líquida de la mezcla mencionada en el paso anterior, se procedió a concentrar la solución. Para ello se empleó un agitador magnético con control de temperatura. La solución fue agitada a una velocidad de 300 rpm, a una temperatura de 60 °C durante un periodo de 24 horas para lograr la concentración de la mezcla.

Precipitación

Una vez que la mezcla estuvo concentrada, se procedió a precipitar los polisacáridos sulfatados presentes. Para ello, un recipiente con etanol se colocó en un baño de hielo, la proporción solución:etanol fue 1:2,. En esta etapa se observó la formación de un precipitado en la mezcla, el cual corresponde a los polisacáridos sulfatados. Ver Figura 15b y 15c.

Purificación

El material obtenido en la etapa de precipitación se lavó con etanol por tres veces con el objetivo de purificarlo.

Secado y pulverizado

El material fue colocado en un horno a 40°C, donde permaneció por 24 horas y se obtuvo, luego de moler mediante un mortero de ágata, el ulvan en polvo. Imágenes representativas del proceso seguido, así como el protocolo de extracción del ulvan se muestran en las Figuras 15 y 16 respectivamente.

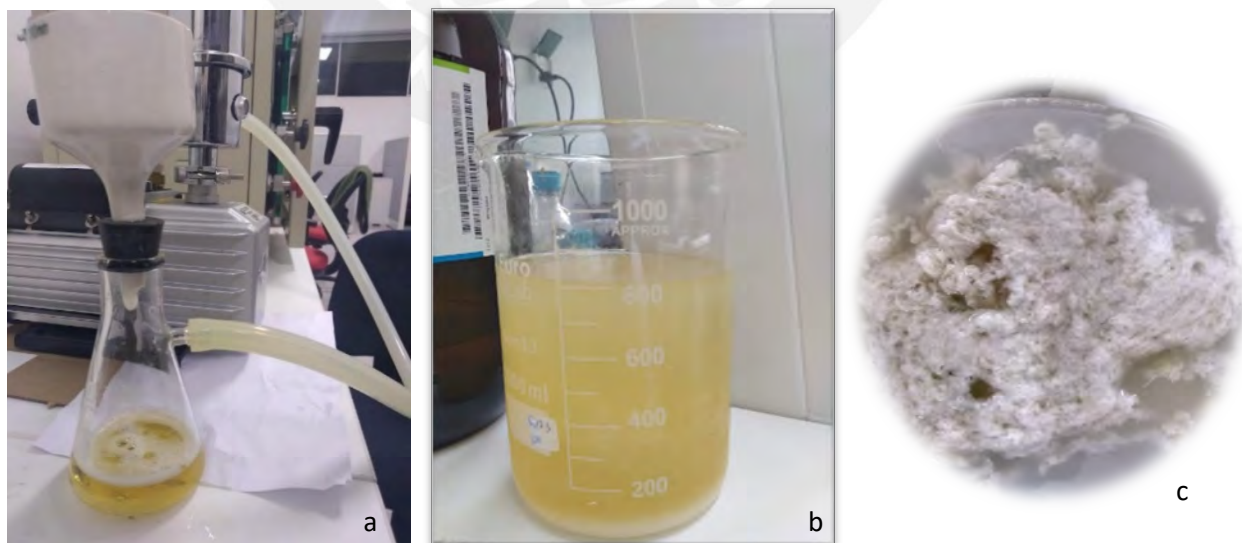


Figura 15. Imágenes representativas de la extracción de ulvan. a) proceso de filtrado. b) precipitado del ulvan c) ulvan obtenido del precipitado.

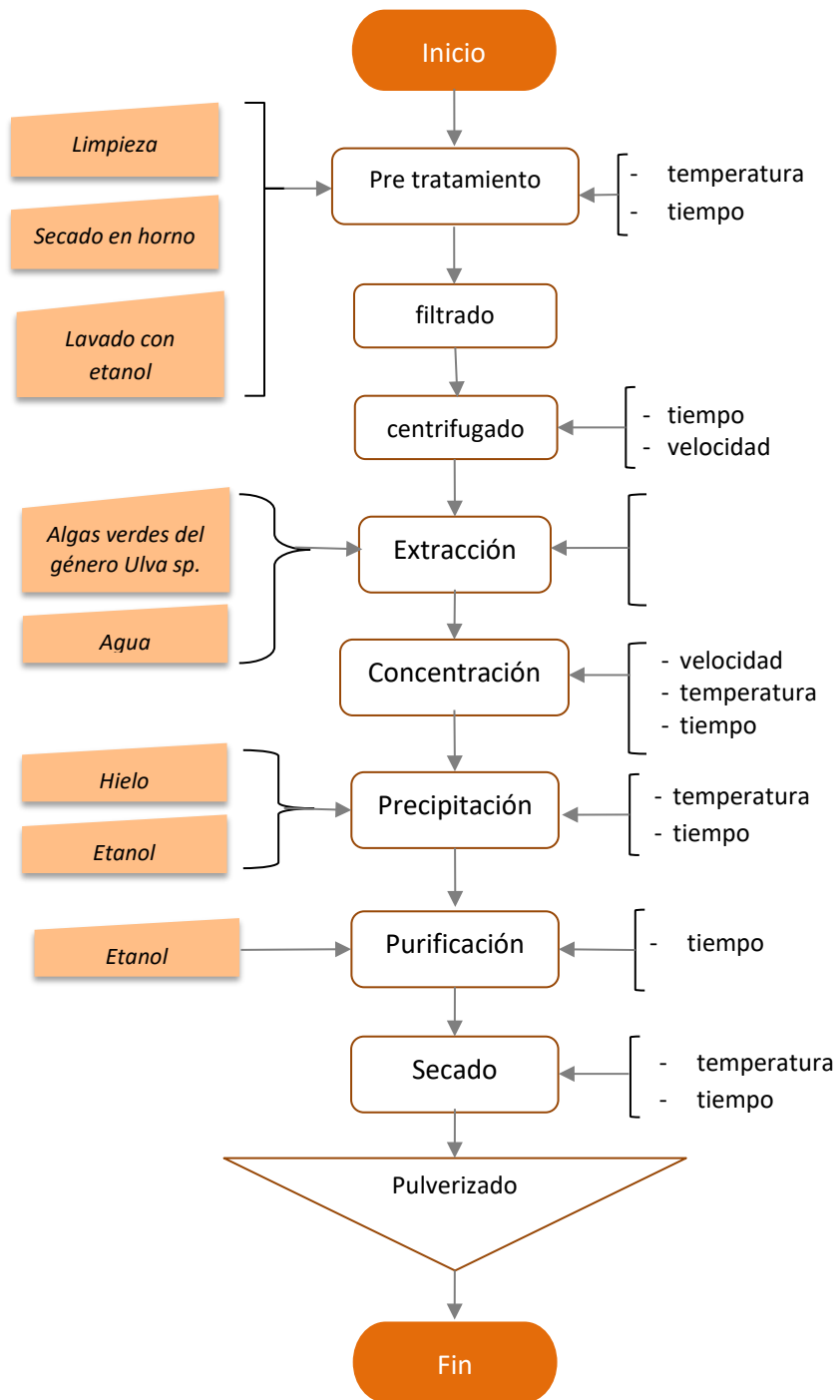


Figura 16. Protocolo de extracción de polvo de ulvan

Carragenina

La carragenina en polvo fue extraída de la macroalga roja comercial *Chondracanthus chamissoi*, ver Figura 17, que pertenece a la familia de las gigartináceas, proveniente de la costa peruana. Se determinó que la carragenina extraída presenta los grupos éster sulfato ($-\text{OSO}_3$) y su estructura es un híbrido entre los tipos kappa (κ) e iota (ι) [104].

Pretratamiento

Se lavó con agua corriente el alga para eliminar residuos como arena, gravas, crustáceos y otros contaminantes, además de enjuagar varias veces para retirar la mayor cantidad de sal y se procedió a triturar el alga. Se secó al horno a 40 °C por 48 horas para obtener el alga seca.

Extracción

Se siguió el método utilizado por Tuvikene et al [105] y Rodriguez et al [104], en el que se utiliza un medio básico para la extracción de la carragenina. Se elaboró una solución de hidróxido de sodio (NaOH) en una concentración de 0.1M, el cual se preparó mediante una solución de 700 ml de agua destilada y 2.8g de NaOH utilizando un agitador magnético.

Reflujo

Se utilizó un equipo de reflujo total, en el cual se colocó el alga seca en un balón de fondo plano, junto con la solución sódica. Luego se calentó hasta una temperatura de 85-90 °C y se mantuvo en ese rango de temperatura durante 4 horas con agitación constante.

Precipitación

El procesamiento continuó con la precipitación de la carragenina a partir de la mezcla obtenida de la etapa anterior. Se utilizó alcohol isopropílico; en una proporción de 1:1; con lo que se obtuvo un precipitado verde insoluble. El precipitado se separó y se procedió a secar a 40 °C durante 24 horas. Luego se volvió a lavar 3 veces con alcohol isopropílico para purificar. Finalmente, se pulverizó la carragenina utilizando un mortero de ágata. El material se puede ver en la Figura 18, el protocolo general de extracción de la carragenina se puede ver en la Figura 19.



Figura 17. Alga de la especie *Chondracanthus chamissoi*.

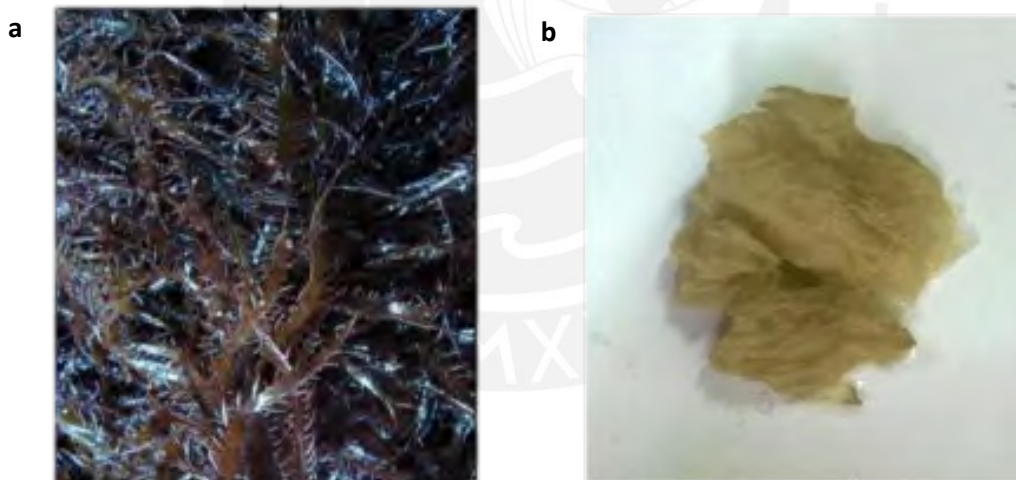


Figura 18. a) Alga *Chondracanthus chamissoi* en estado fresco. b) carragenina purificada.

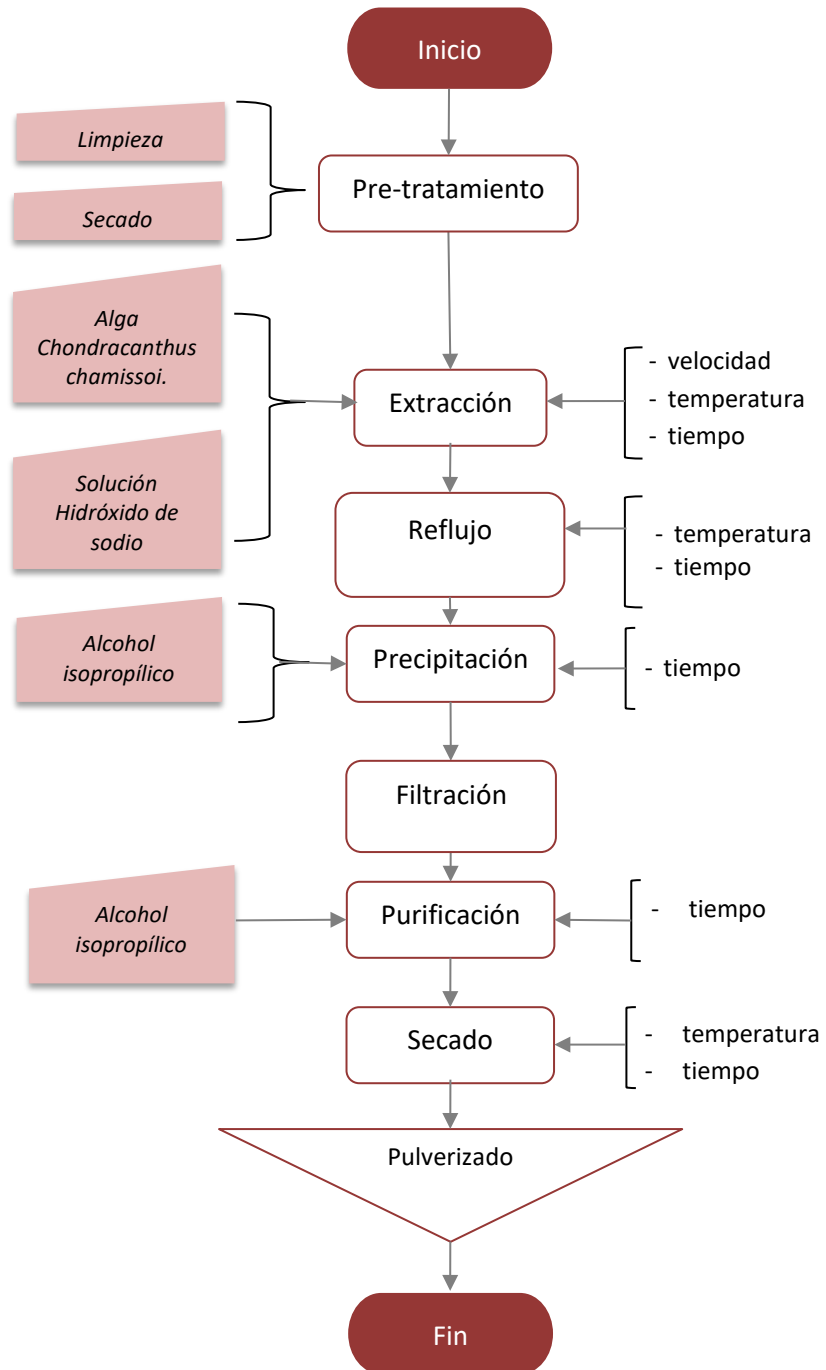


Figura 19. Protocolo general de extracción de la carragenina.

2.5 Films basados en mucílago de *E. pachanoi*, ulvan y carragenina

La Tabla 4 muestra las mezclas y proporciones utilizadas para la elaboración de los distintos films. El porcentaje de polisacárido para cada solución fue de 1% (w/v).

Tabla 4. Films basados en *E. pachanoi* y otros polisacáridos.

Código	% glicerol* (w/w polisacárido)	Proporción de polisacáridos**		
		<i>E. pachanoi</i>	carragenina	ulvan
EP0%GLI	0%	1	0	0
EP10%GLI	10%	1	0	0
EP15%GLI***	15%	1	0	0
UL10%GLI	10%	0	0	1
EPUL10%GLI	10%	1	0	4
EPUL15%GLI	15%	1	0	4
CA10%GLI	10%	0	1	0
EPCA10%GLI	10%	1	4	0
EPCA15%GLI	15%	1	4	0

* El porcentaje de glicerol utilizado está referido al peso de polisacárido utilizado.

** Se indican las proporciones empleadas para cada tipo de mezcla. Por ejemplo, para el código EPUL10%GLI por 1 g de *E. pachanoi* se utilizaron 4 g de ulvan.

*** El % de polisacárido en este film fue de 2% (w/v).

2.5.1 Films de *E. pachanoi*. EP0%GLI, EP10%GLI, EP15%GLI

Se fabricaron films a partir de soluciones de *E. pachanoi*. Para ello, se mezcló el polisacárido con agua destilada, la mezcla se realizó mediante agitación constante durante 12 horas a temperatura ambiente. Luego se calentó la solución a 60°C por 30 min continuando con la agitación; después, se separó la solución en tres recipientes; a dos soluciones se les agregó glicerol en diferentes medidas (10% y 15% en w/w) y una quedó sin glicerina. Luego las mezclas se volvieron a agitar hasta obtener uniformidad. Las soluciones se vaciaron en moldes tipo placa Petri y fueron llevados al horno a 40°C por 72 horas.

2.5.2 Films de ulvan. UL10%GLI

Se fabricaron films de ulvan; para ello se preparó una solución con el polisacárido en agua destilada. Se realizó la mezcla mediante agitación constante durante 12 horas a temperatura ambiente y luego se calentó a 60°C por 1 hora, continuando con la agitación. Finalmente, se le agregó 10% de glicerol en (w/w) y después de agitar, se vació en moldes tipo placas Petri que fueron llevados al horno a 40°C por 72 horas.

2.5.3 Films de ulvan y *E. pachanoi*. EPUL10%GLI, EPUL15%GLI

Se fabricaron films con una solución de 4:1, ulvan: *E. pachanoi* (w/v). Se disolvió el polvo de *E. pachanoi* en agua destilada con el agitador durante 30 min. luego, se le agregó el polvo de ulvan y se continuó agitando por 30 min. más; después se calentó a 60°C por 6 horas, durante ese tiempo se continuó agitando hasta que se obtuvo una solución uniforme. Finalmente, se separó la solución en dos recipientes, se les agregó glicerina, 10% y 15% (w/w) respectivamente; se continuó la agitación hasta obtener mezclas uniformes. Las soluciones se vaciaron en moldes tipo placa Petri y fueron llevados al horno a 40°C por 72 horas.

2.5.4 Films de carragenina. CA10%GLI

Se fabricaron films de carragenina; para ello se preparó una solución con el polisacárido en agua destilada y agitación constante durante 12 horas a temperatura ambiente. Luego se calentó a 60°C durante 1 hora continuando con la agitación; después, se agregó 10% de glicerol y se continuó agitando hasta obtener una mezcla uniforme. Finalmente, la solución se vació en moldes tipo placas Petri y estos fueron llevados al horno a 40°C por 72 horas.

2.5.5 Films de carragenina y *E. pachanoi*. EPCA10%GLI, EPCA15%GLI

Se fabricaron films con una solución 4:1, carragenina: *E. pachanoi* (w/v). Se disolvió el polvo de *E. pachanoi* en agua destilada mediante agitación constante durante 30 min.; luego, se agregó la carragenina en polvo y se continuó con la agitación por 30 min. más. Después, se calentó a 60°C por 6 horas, durante ese tiempo se continuó agitando hasta que se obtuvo una solución uniforme. Finalmente, se separó la solución en dos recipientes, se les agregó glicerina, 10% y 15% (w/w) respectivamente, se continuó la agitación hasta obtener mezclas uniformes. Las soluciones se vaciaron en moldes tipo placa Petri y fueron llevados al horno a 40°C por 72 horas.

2.6 Caracterización del polvo de mucílago de cactus

2.6.1 Estructura (FTIR – ATR)

Con el fin de obtener información de los enlaces químicos y estructurales y grupos funcionales, se realizaron ensayos de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Se utilizó el accesorio de reflexión atenuada (ATR) del equipo Spectrum Two de la marca Perkin Elmer; ver Figura 20. El polvo de mucílago se colocó entre el accesorio ATR y el cristal de diamante. Se obtuvieron los espectros de las muestras al realizar un barrido desde 500 hasta 4000 cm^{-1} a temperatura ambiente con 8 barridos a una resolución de 8 cm^{-1} .



Figura 20. Espectrómetro FTIR Perkin Elmer Spectrum Two con accesorio ATR utilizado en los ensayos.

2.6.2 Análisis térmico (DSC - TGA)

Se realizaron análisis térmicos con el polvo de mucílago de *E. pachanoi*. Se realizó ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) con el equipo Perkin-Elmer DSC 4000; para ello se fabricó un espécimen para ensayo con polvo de mucílago de cactus aproximado de 10 mg. El rango de temperatura en el ensayo fue de 0 °C a 250 °C y la velocidad de 1 °C/min. El ensayo fue realizado en atmósfera de nitrógeno (20 mL/min).

También se realizó análisis termogravimétricos (TGA), con el objetivo de estudiar la estabilidad, pureza, contenido de humedad y degradación del polvo de mucílago. Con muestras de 10 mg, aproximadamente, se realizó el análisis termogravimétrico (TGA) con un equipo Perkin Elmer TGA 4000. El ensayo fue realizado a una velocidad $v=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y el rango de temperaturas fue de 30°C y 800°C. La atmósfera de ensayo fue purgada con gas nitrógeno seco con un caudal de 20ml/min.

2.7 Reología de *E. pachanoi*

Los ensayos de reología tuvieron por fin analizar la estructura del cactus al aplicar un esfuerzo a una velocidad de deformación. Se realizaron ensayos dinámicos oscilatorios con geometría de platos paralelos de 25 mm de diámetro con plato Peltier de acero, con el reómetro modelo Discovery Hybrid Rheometer HR1 de la marca TA Instruments. Ver Figura 21.

La geometría del reómetro cuenta con el plato inferior moleteado. Los ensayos se realizaron con la geometría sin modificar y también con la geometría modificada, que consiste en pegar una lija #40 en el plato superior del reómetro, con el objetivo de evitar el deslizamiento entre los platos y la muestra.

Los especímenes de ensayo fueron discos de 25 mm de diámetro y 3 mm de espesor extraídas de la sección transversales del cactus; los especímenes extraídos fueron inmediatamente ensayados.

Las muestras se ensayaron bajo deformación y frecuencia, el barrido de esfuerzos se realizó en dos etapas de $0.05 - 10^4$ Pa y el de frecuencia desde 0.1 a 100 rad/s con deformación constante de 0.01%.

Con el objetivo de evitar el deslizamiento, se realizaron barridos de deformación a diferentes frecuencias y niveles de esfuerzo. El esfuerzo inducido fue monitoreado y las oscilaciones con una moda no sinusoidal fue considerado como indicativo de deslizamiento. Cada tipo de barrido se realizó 5 veces con distintos discos extraídos de *E. pachanoi*.



Figura 21. Reómetro Discovery HR1 durante el ensayo.

2.8 Caracterización de los films

2.8.1 Estructura (FTIR - ATR)

Se realizaron ensayos de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en los films; se utilizó el accesorio de reflexión atenuada (ATR) del equipo Spectrum Two de la marca Perkin Elmer. Los especímenes fueron trozos de los films que fueron colocados entre el accesorio ATR y el cristal de diamante; se obtuvieron los espectros de las muestras al realizar barridos de 500 hasta 4000 cm^{-1} a temperatura ambiente con 8 barridos a una resolución de 8 cm^{-1} .

2.8.2 Análisis térmico (DSC - TGA)

Se realizaron ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) con el equipo Perkin-Elmer DSC 4000; para ello se cortaron los films en pequeños trozos para fabricar especímenes para ensayo de, aproximadamente, 10 mg. El rango de temperatura en el ensayo fue de 0 °C a 250 °C y la velocidad de 1 °C/min. El ensayo fue realizado en atmósfera de nitrógeno (20 mL/min).

También se realizaron análisis termogravimétrico (TGA) en los films; para ello se cortaron pequeños trozos de los films y con muestras de, aproximadamente, 10 mg se realizaron los análisis termogravimétricos (TGA) con un equipo Perkin Elmer TGA 4000. El ensayo fue realizado a una velocidad $v=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y el rango de temperaturas fue de 30°C y 800°C. La atmósfera de ensayo fue purgada con gas nitrógeno seco con un caudal de 20ml/min.

2.8.3 Caracterización mecánica (tracción)

Las propiedades mecánicas de los films fueron caracterizadas mediante la resistencia a tracción y elongación máxima. Para los ensayos a tracción se utilizó el equipo de tracción Mark-10 M4-20 con una celda de carga de 100 N y una carrera máxima de 330 mm (ver Figura 22). Los ensayos se realizaron bajo la referencia de la norma ASTM D-882 para películas delgadas (espesor menor a 1mm). Los especímenes de ensayo constan de bandas de film de 5 mm de ancho y el espaciado entre las mordazas de 7 cm. La velocidad de avance fue de 10mm/min. Los espesores de las bandas fueron medidos con un micrómetro Gensize 0-25mm – 0.01mm. Se tomaron mediciones en 3 puntos por cada probeta y, para los cálculos del espesor, se empleó los promedios.

Para la recopilación de la información de los datos del ensayo se utilizó el software Measure® Lite. A partir de estos ensayos se obtuvo la resistencia a tracción (σ), módulo de elasticidad (E)

y deformación (ϵ). Se ensayaron 6 especímenes por tipo de films para obtener repetitividad en los ensayos.

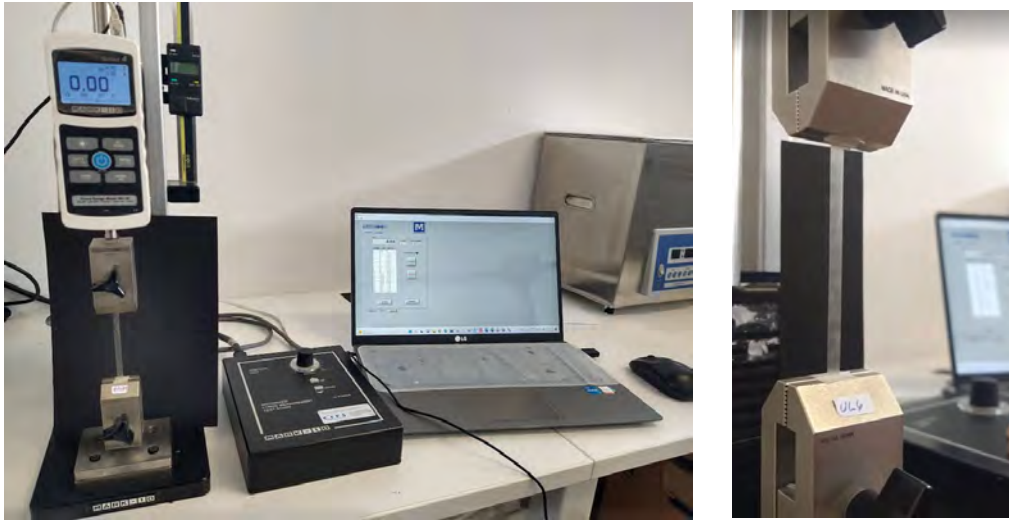


Figura 22. Equipo Mark -10 en el ensayo de tracción

2.8.4 Caracterización morfológica (AFM)

Microscopía de fuerza atómica (AFM)

Los cambios en las complejas interacciones entre las proteínas que pueden ser atribuidas a la desnaturalización y la agregación podrían ser observadas en los estudios de microscopía de fuerza atómica [106].

Las imágenes de AFM se obtuvieron utilizando un AFM Nanosurf Easyscan 2, se realizó a temperatura ambiente en modo dinámico. Se utilizaron vigas en voladizo de silicio con resorte de constante nominal de 2.8N/m disponibles comercialmente, que trabajaron a bajas amplitudes de oscilación con punto de referencia de amplitud media libre. Se obtuvieron imágenes de alta resolución, de 25 μm x 25 μm , cuadros de 512 x 512 pixeles a una velocidad de escaneo de 1 línea por segundo.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del polvo de mucílago de *E. pachanoi*

3.1.1 Extracción de polvo de mucílago

El rendimiento de la extracción de polvo de mucílago fue 0.25%, de 660g de cactus fresco se obtuvo 1.67 g de polvo; este valor se encuentra dentro del rango registrado en la literatura que va entre 0.07 a 3.2% [16][17][15][44], [45], [47], [48], [50].

Los valores del rendimiento están estrechamente relacionados al medio donde crece el cactus, el rendimiento es mayor si el cactus proveniente de zonas áridas, es decir, en lugares con escasa cantidad de agua y climas muy cálidos se obtiene mayor cantidad de mucílago. Asimismo, Sepúlveda et al [15] menciona que el rendimiento depende de la especie de cactus y del método de extracción. El mucílago aumenta como respuesta a las sequías para preservar la planta; además el contenido de mucílago es mayor en tallos con mayor edad que en plantas más jóvenes según lo que menciona Sáenz et al [9].

El espécimen *E. pachanoi* utilizado en el estudio era una planta joven cuyo medio es un jardín en Lima donde recibe riego constante en clima templado; es por ello que se puede inferir que el rendimiento obtenido correspondería a esas condiciones.

3.1.2 Estructura FTIR - ATR

Con el fin de estudiar el impacto del tratamiento de calor en la extracción de polvo de mucílago de *E. pachanoi*, se realizó la extracción con tratamiento de calor y sin tratamiento del calor. Los especímenes M1 y M3 se calentaron a 60°C y 80°C respectivamente durante dos horas y los especímenes M2 y M4 se obtuvieron sin tratamiento de calor. Se monitorearon los cambios empleando espectros de absorción infrarroja; en la Figura 23 se observa que el tratamiento térmico no generó cambios sustanciales en los compuestos y grupos funcionales.

El espectro muestra un pico característico en valor de 3275 cm⁻¹ que corresponde al grupo funcional - OH; indica las vibraciones de estiramientos del O – H y del grupo – OH que participan en enlaces intermoleculares de puentes de hidrógeno. Similares resultados han sido hallados por Otálora et al [107] para mucílago en polvo de *Opuntia ficus indica* y De Souza et al [31] para el mucílago del cactus *Cereus peruvianus* y es común en diversos polisacáridos.

El pico en 2931 cm^{-1} se asigna a vibraciones de estiramiento asimétrico de los C – H y – CH₂ presentes en las moléculas de mucílago de cactus; como lo menciona Rodríguez-González et al [21] para mucílagos de opuntias silvestres.

Los picos en 1736 cm^{-1} , 1383 cm^{-1} y 1246 cm^{-1} son característicos de polisacáridos complejos, de las vibraciones de los estiramientos C – O, C – O– C y de la flexión de O– H respectivamente; lo cual indica la presencia del grupo COOH (ácido galacturónico); valores similares han sido hallados en mucílagos de cactus como el *Cereus peruvianus* [31] y también en Aloe Vera [108].

El fuerte pico en 1041 cm^{-1} y en 1594 cm^{-1} están asignados a la vibración del estiramiento del C– O e indica la presencia de grupos COOH y vibración del estiramiento del C=O. Estos grupos sirven como sitios activos para la unión de partículas coloidales y mucílago [31] .

Los resultados hallados se encuentran dentro de los valores registrados en la literatura [21], [31], [107], [108] para mucílagos de cactus, como opuntias u otros.

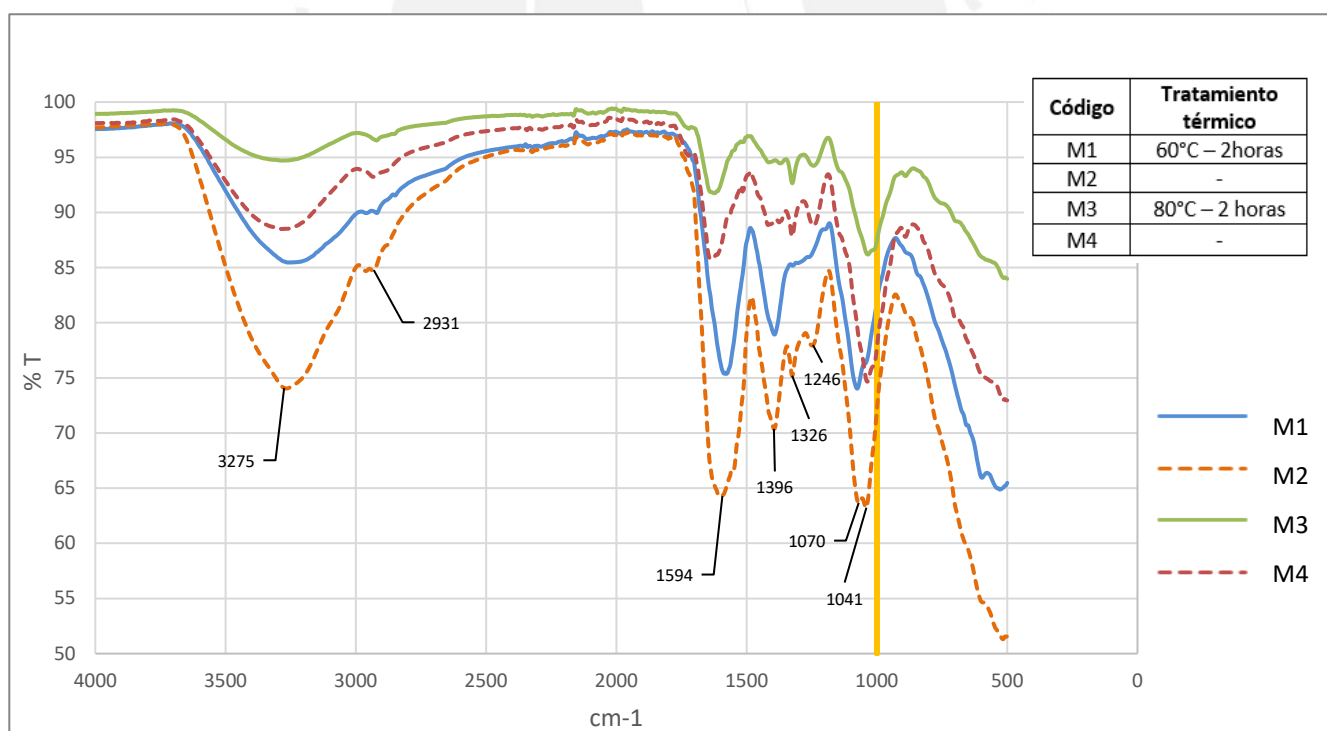


Figura 23. Resultados FTIR del polvo de mucílago de *E. pachanoi*. Las líneas llenas corresponden a muestras calentadas (60 y 80°C) y las líneas punteadas a muestras sin tratamiento de calor.

3.1.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El termograma representativo DSC del *E. pachanoi* se muestra en la Figura 24. Existen dos picos endotérmicos, el primero es pronunciado entre 5°C hasta 94°C con pico en 55.42 °C; y el segundo entre los 126°C hasta 152°C con pico en 137.90°C, es un pico poco profundo. El primer pico se atribuye al hinchamiento del polvo de mucílago debido a la ruptura de algunos enlaces de hidrógeno y el segundo podría atribuírsele a la aparición de una interacción hidrófoba entre las moléculas del polvo, algo similar ocurre en el curdlan según estudios de Nishinari et al [109]. Por otro lado, Feng et al [110] menciona que los múltiples puntos de fusión pueden ser atribuidos a varios factores, tales como que haya dos diferentes formas cristalográficas, cristalitos que varían en grados de perfección, diferencia en el tamaño de los cristalitos, etc. También puede tener que ver la heterogeneidad de la composición, temperatura de cristalización, velocidad de calentamiento o enfriamiento; según en el estudio del copolímero propileno-etileno.

Finalmente, se da un evento exotérmico a partir de 220 °C, el cual puede ser atribuido a la degradación del polisacárido; similar comportamiento térmico fue reportado para muestras de mucílago de aloe vera por Otálora et al [108].

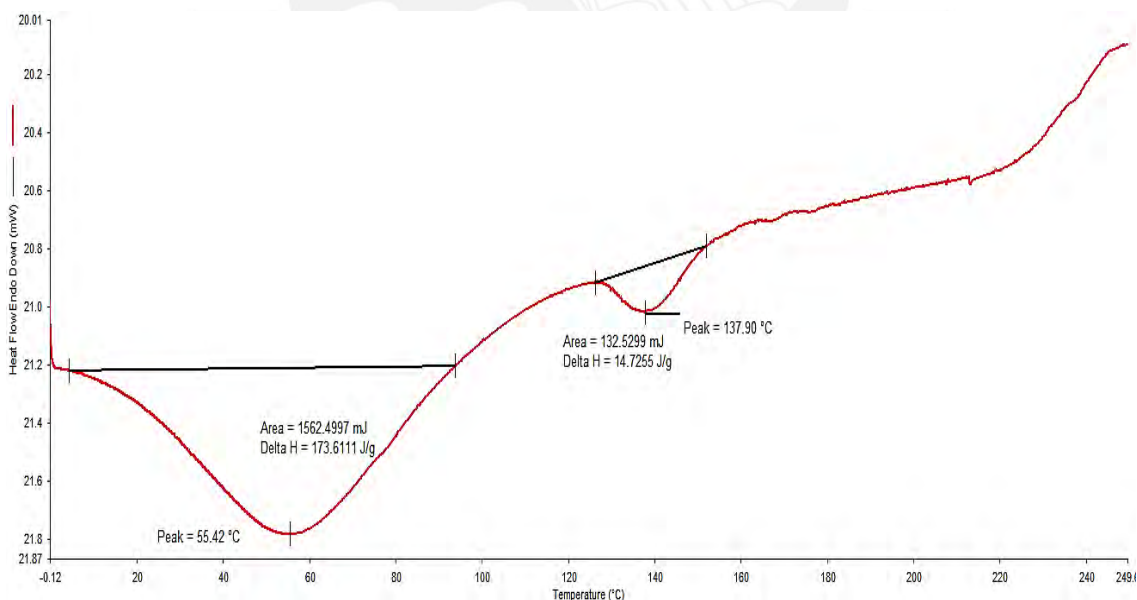


Figura 24. Termograma representativo DSC del polvo de mucílago de *E. pachanoi*.

3.1.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

Según el termograma representativo del polvo de mucílago que se muestra en la Figura 25, las pérdidas de masa ocurren en varios rangos. Según la curva, observa una primera pérdida peso, del 12.12%, que está referida a pérdida de humedad que va hasta los 160°C relacionada con la naturaleza hidrofílica de los grupos funcionales de los polisacáridos presentes en el mucílago de cactus [108] [111].

El segundo evento corresponde a la primera degradación donde se produce la segunda pérdida importante de masa, del 30.4 %. Este evento puede ser atribuido a la degradación del material con ruptura de las ramificaciones [111]. La pérdida de masa acumulada durante el ensayo fue de 72%; la masa residual a 800°C correspondería a compuestos inorgánicos presentes en el mucílago. El porcentaje de cenizas fue menor al 30%; una similar porcentaje de cenizas ha sido reportada por Otálora et al [108] para *Opuntia ficus indica*.

Se observó que el tratamiento térmico realizado en la extracción del mucílago no afectó su composición y comportamiento térmico, puesto que el análisis térmico de las muestras con tratamiento térmico (60° y 80°C por dos horas) y sin tratamiento térmico presentaron resultados similares.

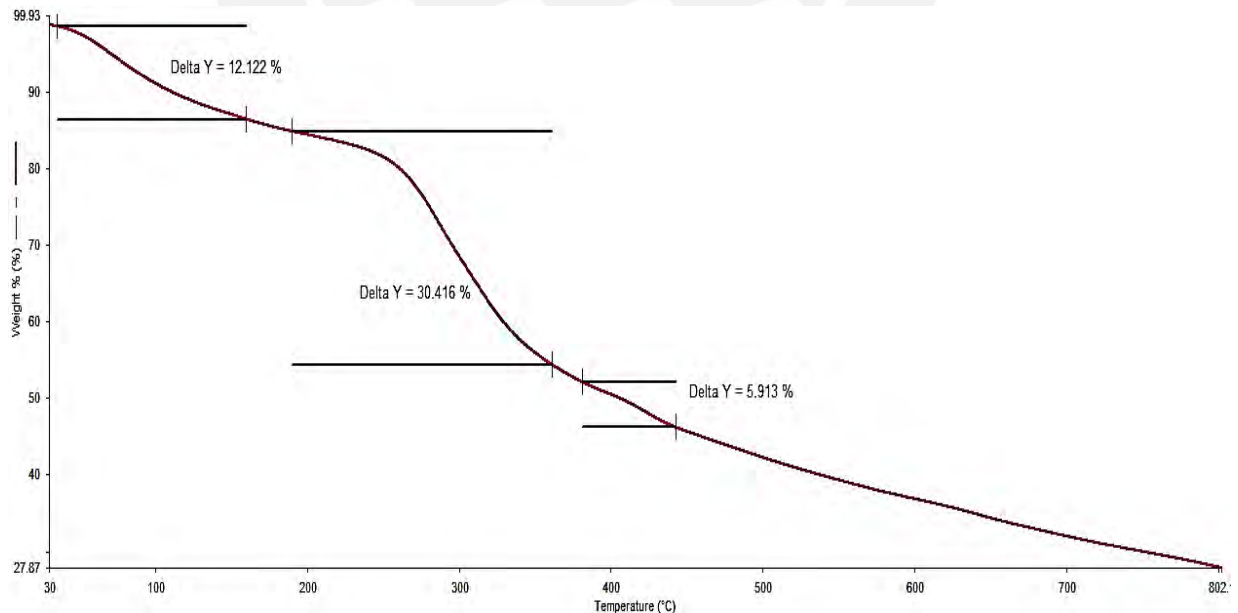


Figura 25. Termograma representativo TGA del polvo de mucílago de *E. pachanoi*.

3.2 Reología del gel de *E. pachanoi*

La gráfica de barrido de la Figura 26 muestra la evolución de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') en función de la deformación se observa que en las respuestas de los módulos G' y G'' predomina el comportamiento elástico, pues $G' > G''$ en el primer rango. También, identificó el límite de viscoelasticidad lineal (LVR) en la gráfica de la Figura 26. Se determinó el punto del módulo elástico antes de la caída de valores en función a la deformación de corte aplicado.

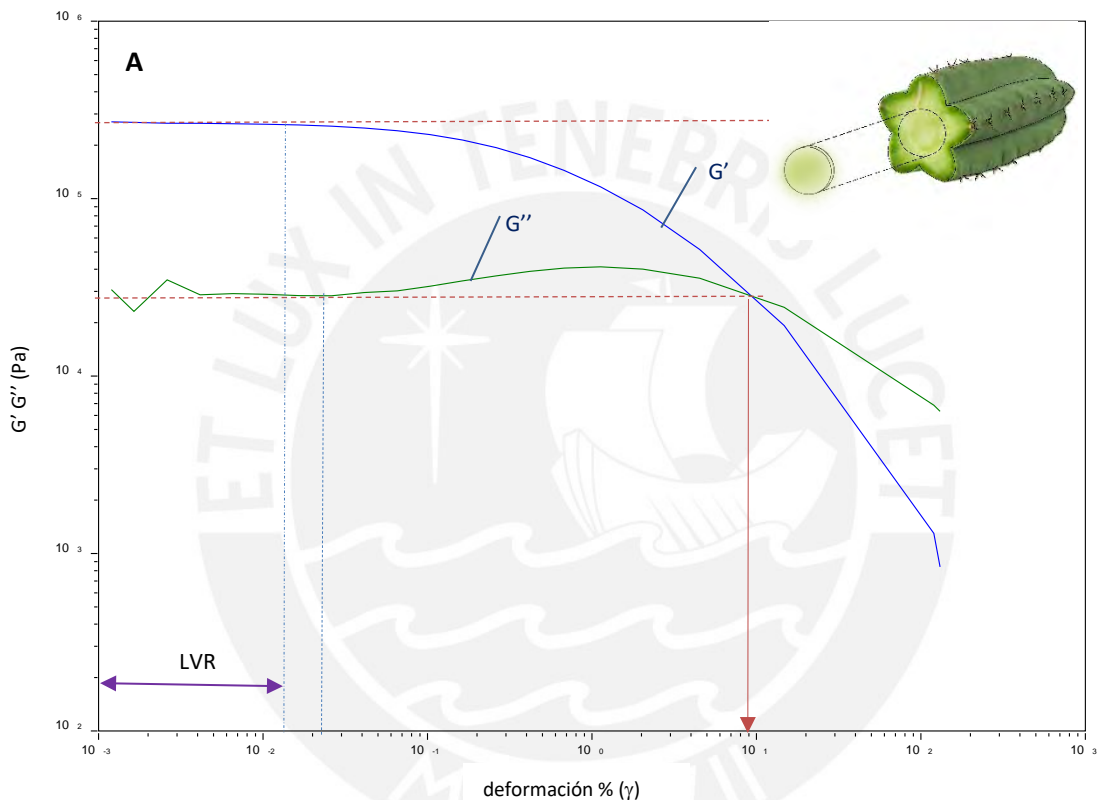


Figura 26. Imagen representativa de la evolución de G' y G'' en función al barrido de deformación de la muestra de sección transversal del cactus *E. pachanoi*. La imagen insertada muestra la morfología del espécimen ensayado.

Se halló que el valor de G' permanece constante en el valor de 270 kPa y el valor de deformación crítica por corte, que es el valor de deformación máxima (γ_c) a la cual el valor de G' permanece constante dentro del límite de viscoelasticidad lineal (LVR), es 0.014%.

Al seguir incrementando los valores de deformación aplicada, los valores de G' y G'' oscilan con una amplitud fuera de LVR, es decir, el comportamiento elástico de G' es afectado por la deformación. Los valores decaen y va predominando la respuesta donde el material es más parecido a un fluido que a un sólido. El módulo de viscosidad G'' permanece constante hasta

0.04% en el ensayo. Este comportamiento se puede asociar a cambios que ocurren en el nivel estructural del material.

En la Figura 27 se muestra la dependencia de los módulos elástico (G') y viscoso (G'') de la muestra de *E. pachanoi* en función de la frecuencia angular. Hasta 100 rad/s se presenta un comportamiento predominantemente elástico, puesto que $G' > G''$.

La Figura 28 muestra la dependencia de G' y G'' con el esfuerzo oscilatorio del ensayo de un disco transversal extraído directamente del cactus que contiene además del mucílago, tejido. El módulo de almacenamiento comienza a disminuir alrededor de 60 Pa, mientras que el módulo de pérdida disminuye alrededor de 600 Pa.

Al inicio existe una región lineal, G' y G'' son constantes, hasta alrededor de 100 Pa; entre 100 y 1000 Pa de esfuerzo oscilatoria, hay una región de ablandamiento donde el módulo de almacenamiento decrece y el de pérdida se incrementa. Se puede observar un comportamiento de deformación reversible (*reversible stress softening*), pues al regresar la carga de 5500 a 0 Pa, los módulos vuelven a los valores iniciales, como se observa en la Figura 28. En redes entrecruzadas, el comportamiento de deformación reversible ha sido explicado en términos de filamentos o entrecruzamientos rotos.

Mediante el ensayo se observó que la deformación no produjo una alteración permanente o la ruptura del entrecruzamiento. Los esfuerzos y deformaciones, no llegan a cambiar de modo irreversible la estructura de la red. Varios ensayos realizados en las muestras han dado como resultado las mismas curvas.

Mecanismos similares se hallarían en el tejido del calamar y en las redes de celulosa según las investigaciones de Torres F. G. et al [112], [113] donde discute que los enlaces físicos entrecruzados no son permanentes; que pueden destruirse, pero también pueden formarse nuevamente. De manera similar, la estructura del polisacárido del *E. pachanoi* tiene la capacidad de formar enlaces intermoleculares que podría ayudar a explicar este comportamiento.

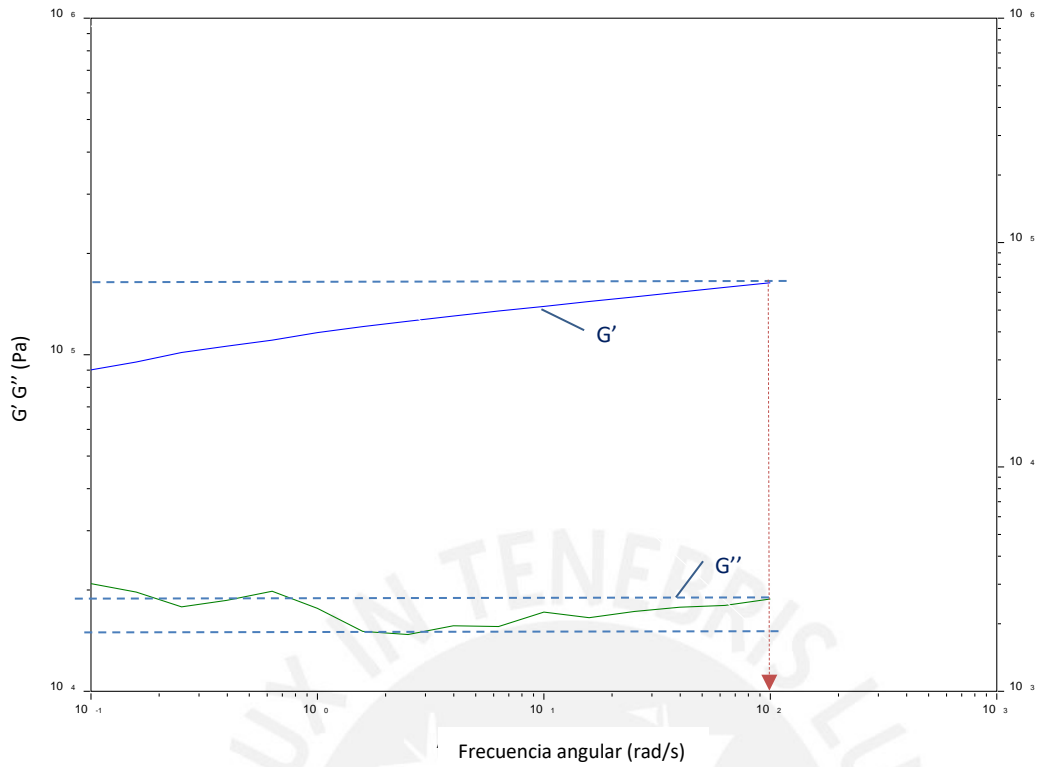


Figura 27. Imagen representativa de la evolución de G' y G'' en función de la frecuencia angular.

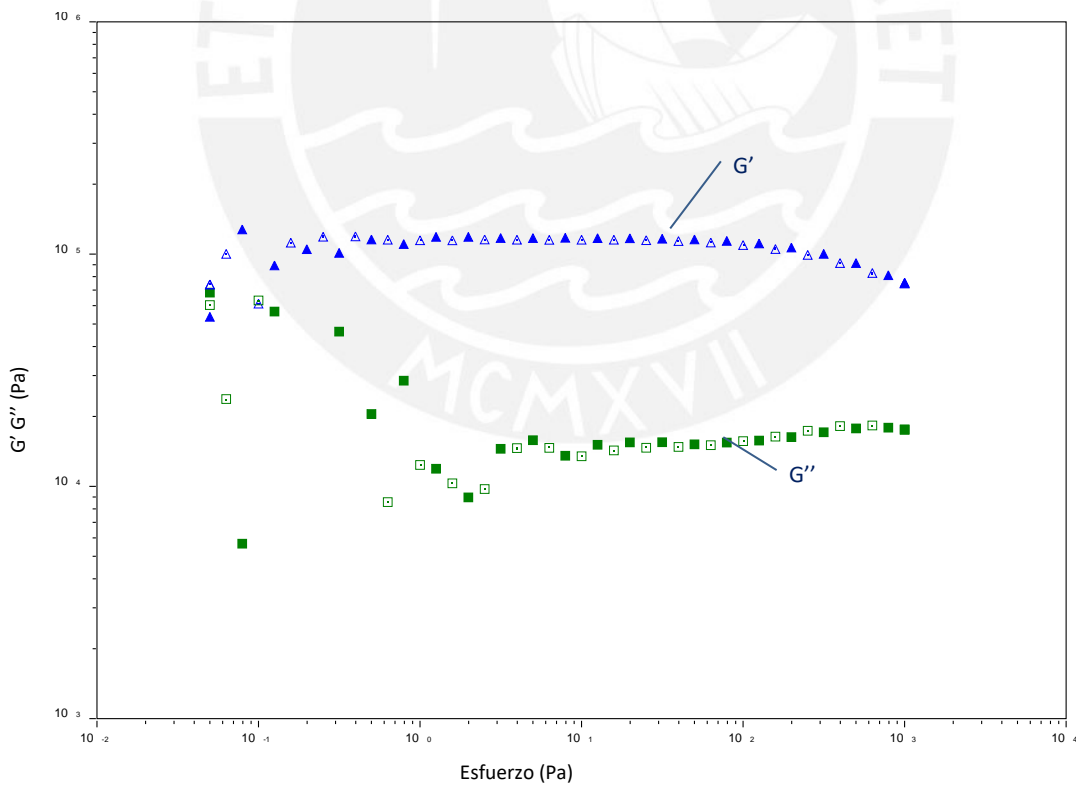


Figura 28. Imagen representativa de la evolución de G' y G'' en función del esfuerzo para discos de *E. pachanoi*. El primer barrido (triángulos y cuadrados llenos) fue realizado con un esfuerzo oscilatorio creciente de 0 a 5500 Pa, y el segundo (triángulos y cuadrados sin relleno) corresponde a la aplicación decreciente de esfuerzo de 5500 a 0 Pa.

3.3 Caracterización de los films a partir de *E. pachanoi*, ulvan y carragenina

3.3.1 Formación de films

Las soluciones de polvo de mucílago de cactus *E. pachanoi*; con 0%, 10% y 15% de glicerol (EP0%GLI, EP10%GLI y EP15%GLI), puestos en moldes tipo placas Petri y secado a 40°C durante 24 horas no lograron formar films; observándose un material frágil.


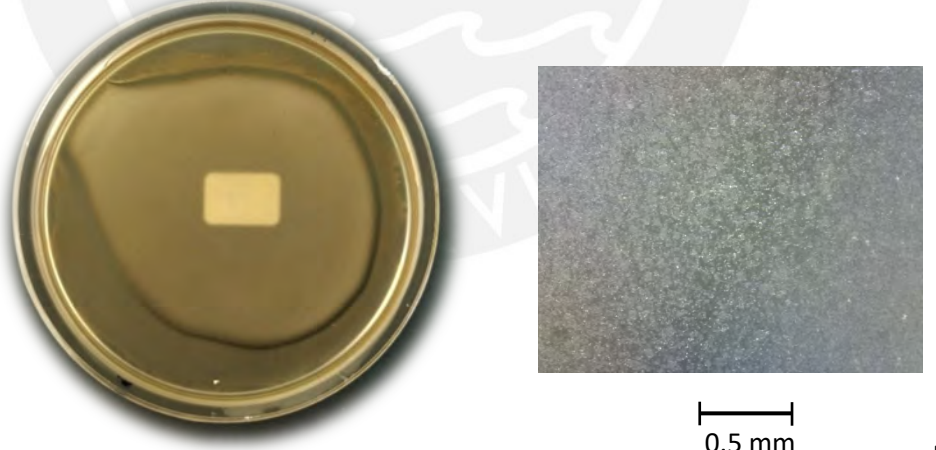
En el caso del *E. pachanoi* sin glicerol, no se formó film, se obtuvo un material opaco, quebradizo y frágil. En el caso del espécimen con 15% de glicerol, se redujo la fragilidad del material, pero no lo suficiente para formar un film. En el caso del material elaborado con 10% de glicerol resultó totalmente adherido a la placa Petri, sin posibilidad de retirarlo sin desintegrarlo; sin embargo, no se quebró espontáneamente como en los casos anteriores. En el microscopio de la Figura 29 A, B y C se pueden los films representativos de *E. pachanoi*.

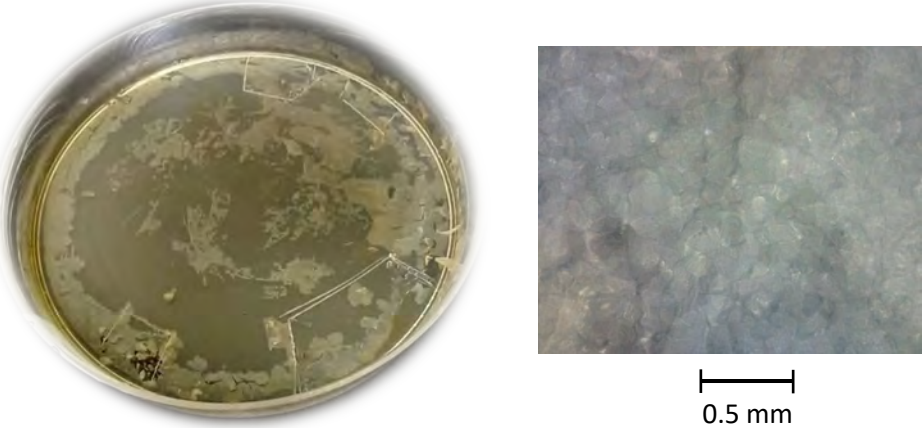
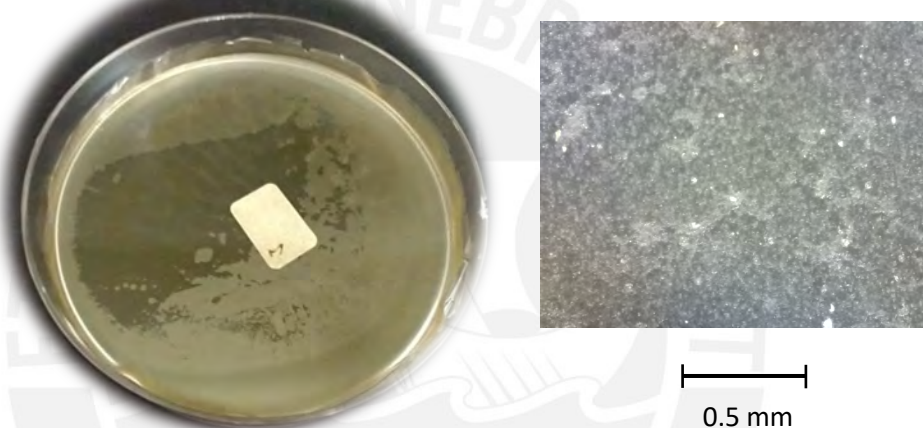
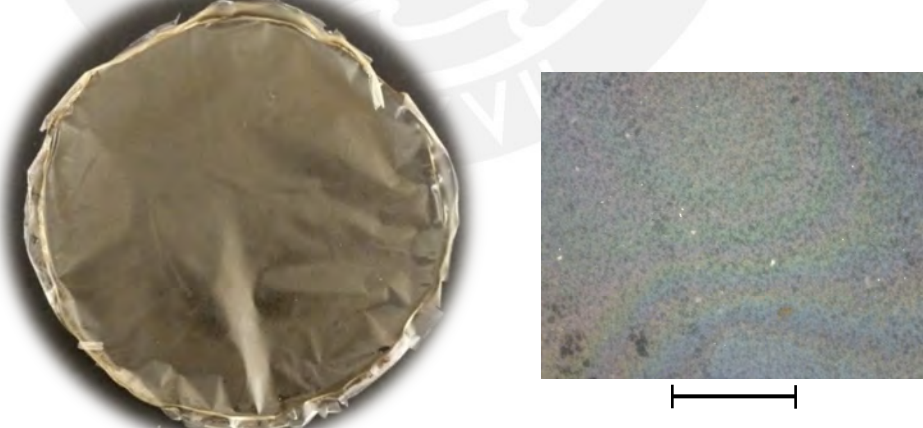
El ulvan y glicerina (UL10%GLI) formó film. Asimismo, las mezclas de *E. pachanoi* con ulvan (EPUL10%GLI, EPUL15%GLI), 1:4 cactus:ulvan (w/w) formaron films transparentes y manejables. En el microscopio se pudo observar en el film la estructura compuesta de partículas esféricas y filamentos alargados. En el caso de los films elaborados con mezclas de ulvan con *E. pachanoi*, estas estructuras se encuentran más dispersas comparado con los de ulvan solo. Ver Figura 29 D, E y F.

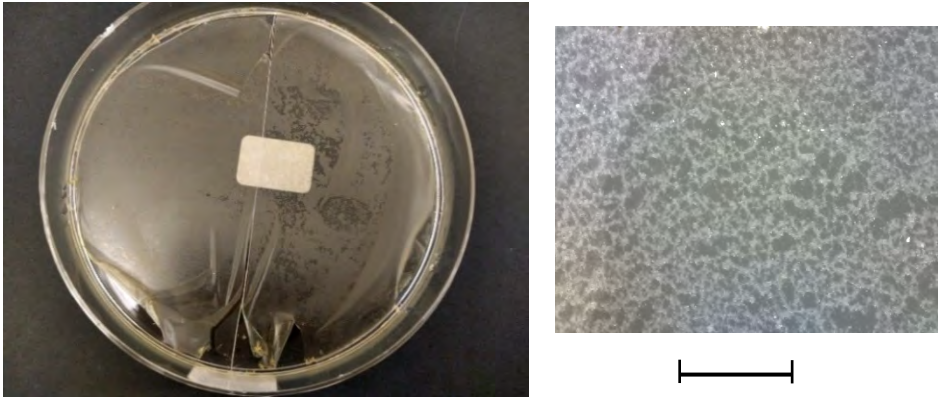
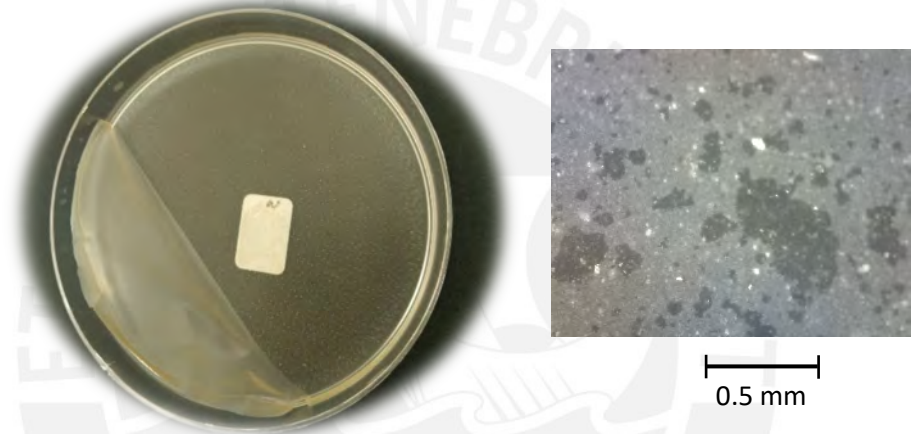
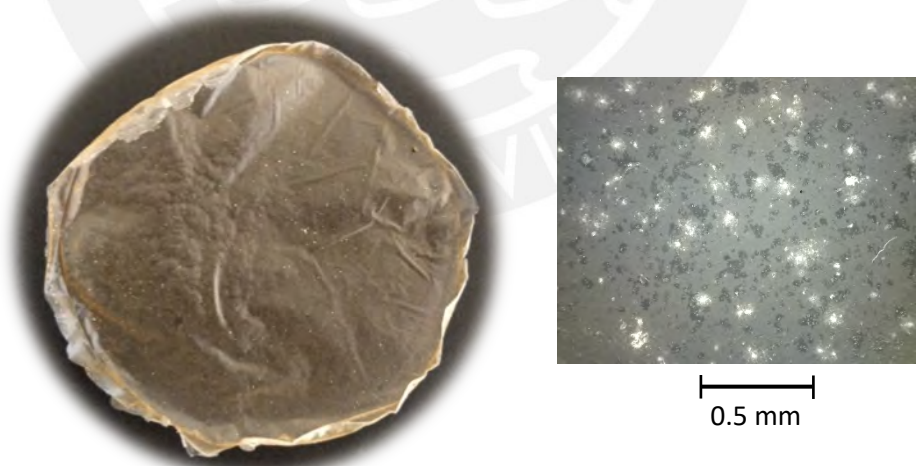
Los especímenes de carragenina con 10% glicerol (CA10%GLI) formaron films. Los films basados en carragenina (CA10%GLI, EPCA10%GLI y EPCA15%GLI) fueron opacos y presentaron formaciones blancas que generaron rugosidad en los films. Se observa que, a mayor cantidad de glicerol, la densidad de las formaciones es mayor. Según Patel et al [114] el mecanismo de gelación de la ι - carragenina implica la formación de la hélices seguida de la agregación de hélices inducida por sal y/o temperatura, lo que podría generar la formación de clústeres. Por otro lado, Paula et al [115] halló alta densidad de clústeres en los films de ι - carragenina y menciona que la temprana gelación en los films se debería a la alta temperatura de transición espiral-hélice (cerca de los 45°C) que promueve la gelificación temprana tras la exposición de las dispersiones a temperatura ambiente durante el vaciado. Otra posible causa de los clústeres es la presencia de sales como contaminantes de la carragenina que favorece la gelificación antes de la formación del bioplástico o en lugar de la misma. Los clústeres generan heterogeneidad en el bioplástico, lo que significaría menor resistencia a esfuerzos de tracción, por ejemplo, baja deformación unitaria ante esfuerzos y menor módulo de elasticidad en relación a un film sin heterogeneidades. Ver Figura 29, G, H e I.

Se observó al tacto, tomando los films con las manos, que el contenido de glicerol influye en la flexibilidad de los films; a mayor contenido de glicerol, mayor flexibilidad.

Asimismo, los films basados en ulvan resultaron más homogéneos y transparentes comparados con los de carragenina.

Código	Imágenes representativas de los films
EP0%GLI	 <p data-bbox="1107 1048 1206 1115">0.5 mm</p> <p data-bbox="1353 1146 1372 1173">A</p>
EP10%GLI	 <p data-bbox="1107 1621 1206 1688">0.5 mm</p> <p data-bbox="1353 1653 1372 1680">B</p>

<p>EP15%GLI</p>	 <p>0.5 mm</p> <p>C</p>
<p>UL10%GLI</p>	 <p>0.5 mm</p> <p>D</p>
<p>EPUL10%GLI</p>	 <p>0.5 mm</p> <p>E</p>

<p>EPUL15%GLI</p>	 <p>0.5 mm</p> <p>F</p>
<p>CA10%GLI</p>	 <p>0.5 mm</p> <p>G</p>
<p>EPCA10%GLI</p>	 <p>0.5 mm</p> <p>H</p>

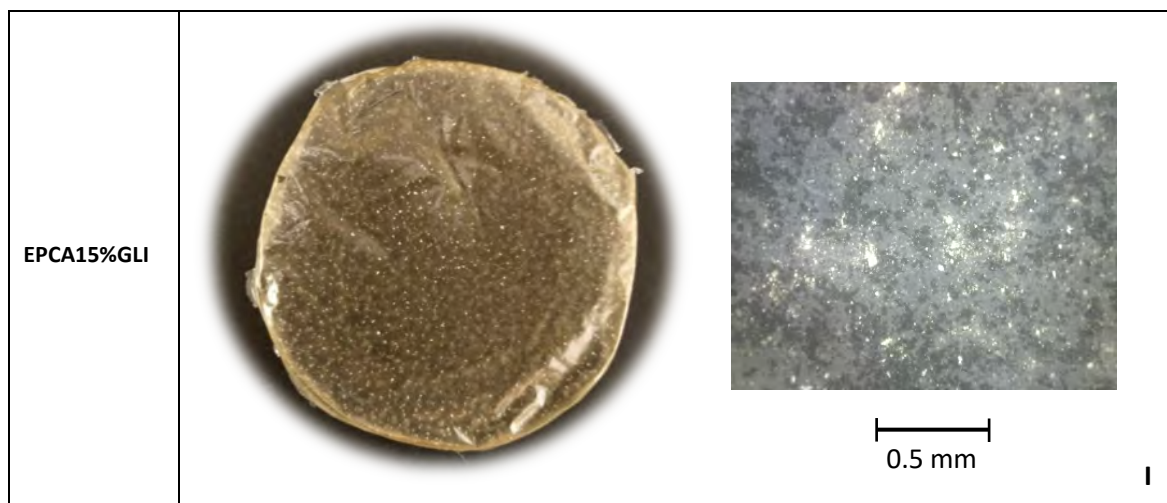


Figura 29. Imágenes macro representativas de los films obtenidos y de microscopio (microscopio digital Dinolite Premier modelo FC-Z-OC2).

3.3.2 Estructura FTIR - ATR

Films de E. pachanoi y ulvan (UL10%GLI, EPUL10%GLI y EPUL15%GLI)

En la Figura 30 se presenta los espectros FTIR de los films basados en ulvan y las mezclas de ulvan y *E. pachanoi*. Los films de las mezclas muestran espectros similares a los films del ulvan, pero con picos menos pronunciados.

El pico entre $3306 - 3272 \text{ cm}^{-1}$ se atribuye a las vibraciones de los estiramientos del grupo $-OH$, mientras que el pico en 2936 cm^{-1} a las vibraciones de los estiramientos de los grupos $C - H$; similares resultados hallaron Tabarsa et al [116] en los estudios de la especie *Ulva intestinalis*.

Los picos entre 1000 y 1200 cm^{-1} se atribuyen al anillo de azúcar y las vibraciones del estiramiento de la flexión glicosídica $C - O$ según Coimbra et al [117] en estudios de extractos de polisacáridos de vino blanco; asimismo, según Shao et al [118] indica la configuración de la piranosa de la estructura del azúcar.

Los picos observados en 1216 y 846 cm^{-1} correspondería a las vibraciones de los estiramientos de $S = O$ y la vibración de flexión del $C - O - S$ del sulfato, según menciona Hernández-Garibay et al [119] en estudios de los polisacáridos del *Ulva clathrata* y Trivedi et al [120] en investigaciones sobre procesos de extracción de combustibles y químicos de macroalgas marinas.

Los grupos carboxil ($-COO$) se muestran en dos picos; uno es el estiramiento asimétrico cerca de 1630 cm^{-1} y el otro pico, más débil, de estiramiento simétrico cerca de 1400 cm^{-1} . Las bandas cercana a 850 y la de 786 cm^{-1} están relacionadas a los ciclos de azúcar, similar a lo hallado por Robic et al [62] en sus estudios de la pared celular del polisacárido de *Ulva spp.*; y también Sari-Chmayssem et al [121] para el alga *Ulva linza*, especie de origen libanés.

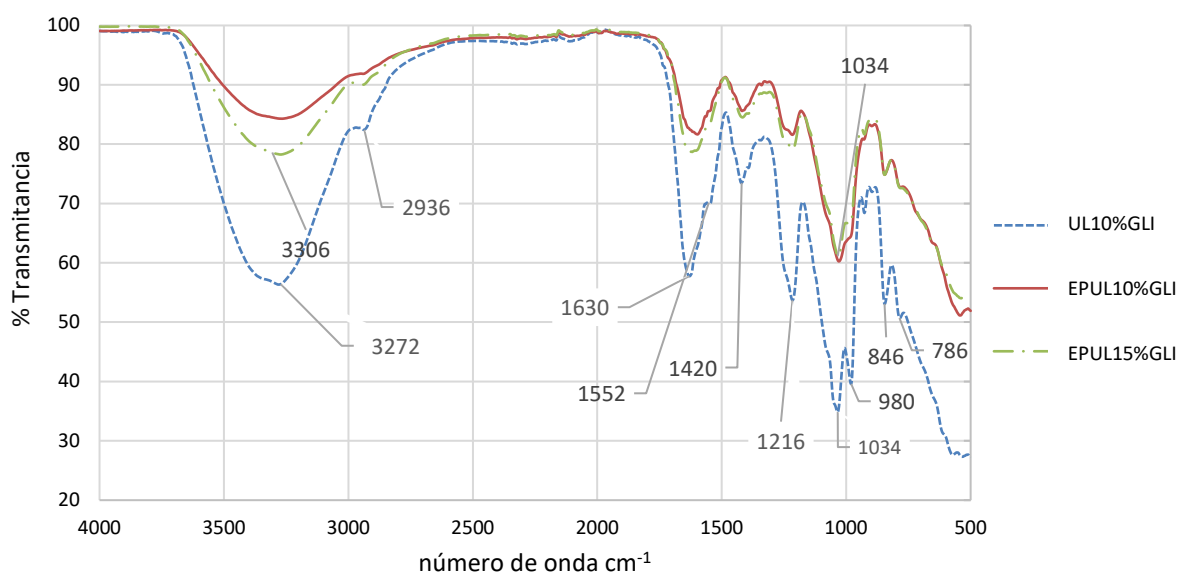


Figura 30. Espectro FTIR representativo de films de ulvan (UL10%GLI) y de la mezcla de *E. pachanoi* y ulvan (EPUL10%GLI y EPUL15%GLI)

Films de *E. pachanoi* y carragenina (CA10%GLI, EPCA10%GLI y EPCA15%GLI)

En la Figura 31 se puede observar que los espectros FTIR muestran similitudes entre los films de carragenina y glicerol y los de la mezcla de carragenina, *E. pachanoi* y glicerol.

La banda en el rango entre 3000 cm^{-1} y 3600 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de los estiramientos grupos hidroxilos $O-H$, que se presentan principalmente en polisacáridos y polifenoles existentes en ambos polisacáridos. El rango que se observan entre 3000 cm^{-1} y 2700 cm^{-1} estarían asociados a vibraciones de los estiramientos en $C-H$, según menciona Vásquez et al [122] en el estudio de macroalgas *Macrocytis pyrifera* y *Chondracanthus chamissoi*, ésta última es la especie de la cual se obtuvo la carragenina para el presente trabajo. El pico alrededor de 930 cm^{-1} correspondería a la presencia de 3,6-anhidro-D-galactosa ($C-O-C$) [123] asimismo, la banda en 844 cm^{-1} sería asignado a D-galactosa-4 sulfato ($C-O-S$) [124], típico de la carragenina híbrida según menciona Pereira et al [124], [125] en sus estudios de identificación de polisacáridos en macroalgas. El pico en 1220 cm^{-1} estaría asociado a éster de sulfato

(O = S = O); así como el pico en 1156 cm^{-1} corresponde a los estiramientos simétricos del grupo C = O = C, coincidiendo con los estudios realizados por Kanmani & Rhim [126]. Estos resultados son típicos en relación a la carragenina.

Los espectros FTIR con plastificante (glicerol) de los films con y sin cactus son similares, excepto para las bandas relativas a O – H y C – H. Se puede ver que, al aumentar la concentración de glicerol, de 10% a 15%, la estructura de los films se ve afectada, pues el área de la banda relativa a O – H disminuye y se desplaza de 3372 cm^{-1} a 3342 cm^{-1} . En el caso de los estiramientos C – H, no mostraron desplazamiento, sin embargo, se intensificaron los picos en 2920 cm^{-1} y 2852 cm^{-1} .

El número de enlaces O – H disminuyeron con el aumento de glicerol y ello podría tener influencia en las propiedades del bioplástico porque las moléculas de agua podrían entrar con menor facilidad, lo que disminuiría su solubilidad. También, se evidencia que la banda asociada a las vibraciones de los estiramientos de C – H, crece (bandas 2920 y 2852 cm^{-1}) debido al aumento de plastificante. Este comportamiento se diferencia de lo registrado en la investigaciones de Cerqueira et al [127] y Guidara et al [128] que mencionan que los plastificantes como el glicerol hacen que los films sean más hidrofílicos.

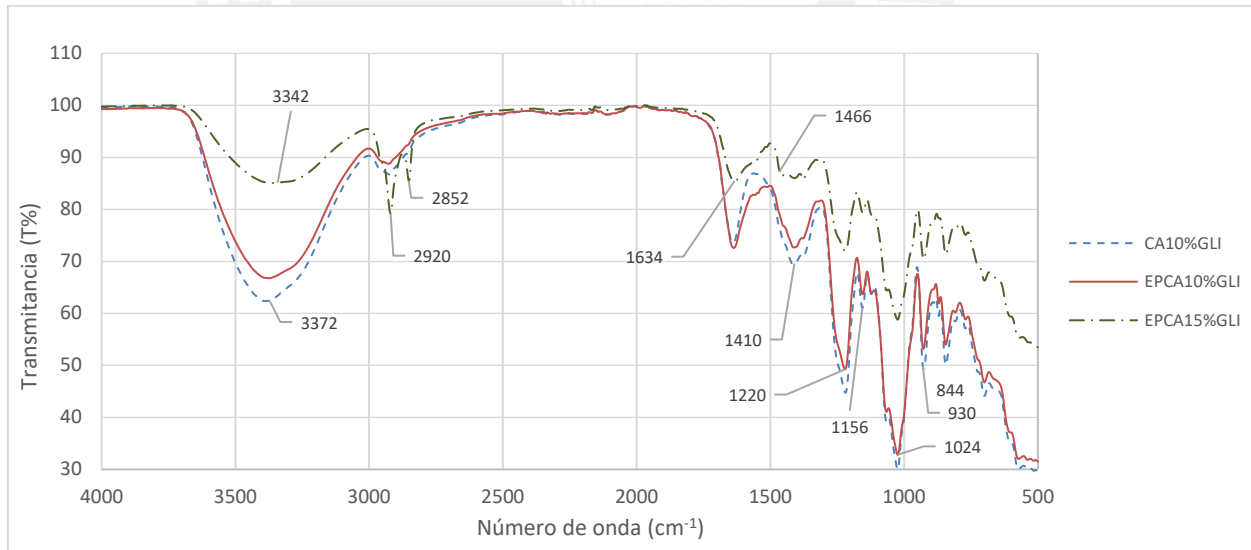


Figura 31. Espectro FTIR representativo de los films de carragenina (CA10%GLI) y de la mezcla de *E. pachanoi* y carragenina (EPCA10%GLI y EPCA15%GLI)

3.3.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Films *E. pachanoi* y *ulvan* (UL10%GLI, EPUL10%GLI)

En el termograma representativo DSC del film de ulvan con 10% de glicerol (UL10%GLI) que se muestra en la Figura 32. El primer evento endotérmico se da entre 66.79°C – 111.17°C con pico en 88.59 °C y 96.99 J/g. Esta transición se asigna al proceso de deshidratación y evaporación de la humedad de la muestra; esto es usual en ulvan como menciona Sulastris et al [129] y Cassani et al [130] en la termocaracterización de ocho especies de algas. La segunda curva es exotérmica y está relacionada a la degradación principal del polisacárido que implica la descomposición de los azúcares en los restos de ulvan, que se da alrededor de 202 °C. Según lo menciona Tziveleka et al [131] la estabilidad del ulvan estaría asegurada antes que ocurra el evento exotérmico que, en el caso del presente estudio, se da alrededor de 180°C. Asimismo, el estudio menciona que podría ser el resultado del rompimiento de enlaces C – H y los enlaces glucósidos C – O – C.

En el caso de los films producto de la mezcla entre ulvan, *E. pachanoi* y glicerol (EPUL10%GLI) el termograma mostrado en la Figura 33, muestra que se incrementa la temperatura de evaporación de la humedad del film con pico de 88.59 °C a 97°C con la inclusión de *E. pachanoi*; asimismo, se logra que la estabilidad térmica aumente, pues la degradación del polisacárido se inicia en 190°C en lugar de 183°C. Este comportamiento, que puede atribuirse a la interacción entre el ulvan y el mucílago de *E. pachanoi*, mejora los enlaces principales; esto es mencionado por Mariia et al [132] en sus investigaciones realizadas en un hidrogel basado en chitosan y ulvan que reportó un comportamiento similar, por lo que podría generar un bioplástico más resistente.

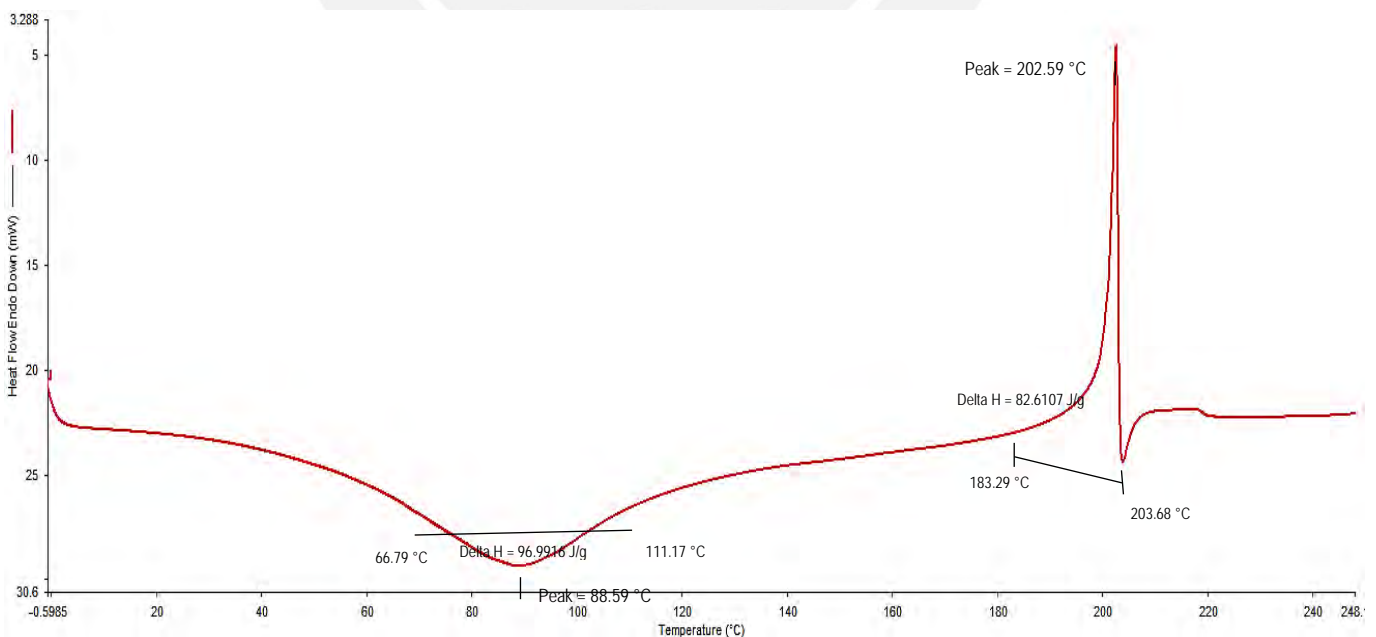


Figura 32. Termograma DSC representativo de films de ulvan (UL10%GLI).

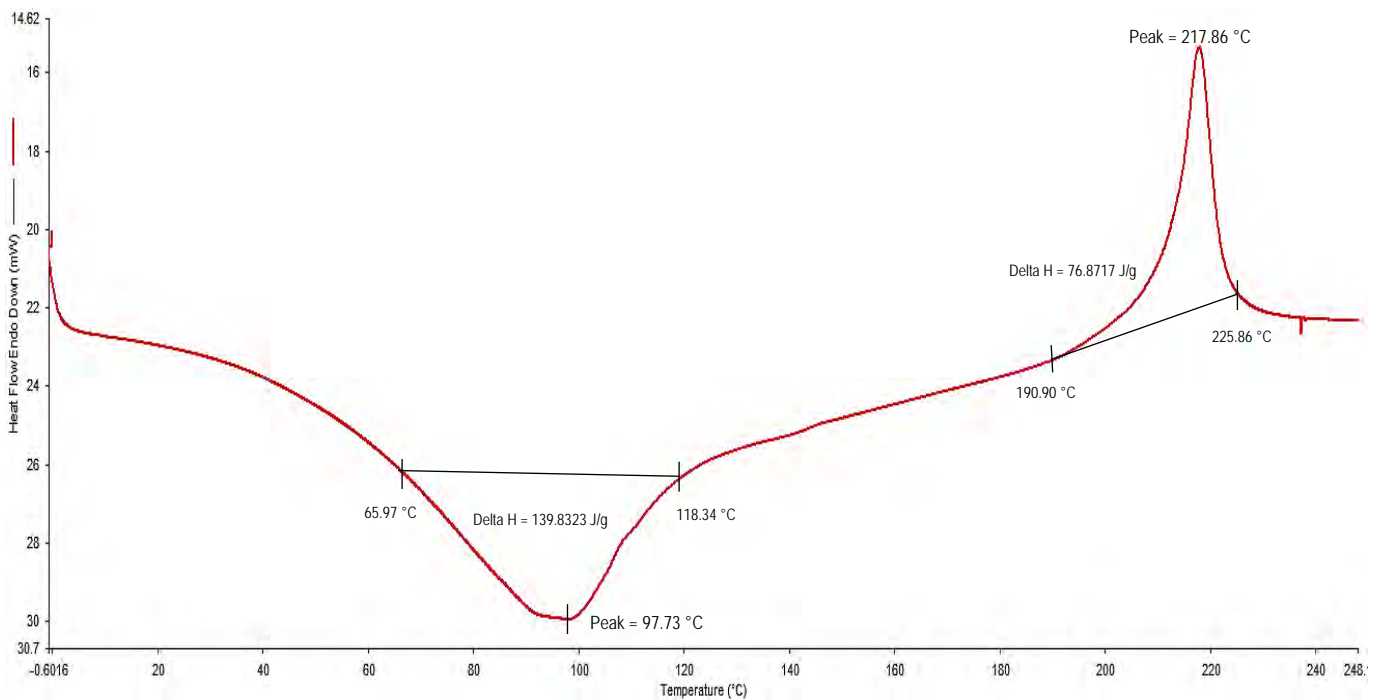


Figura 33. Termograma DSC representativo de films de la mezcla de *E. pachanoi* y ulvan (EPUL10%GLI).

Films de *E. pachanoi* y carragenina (CA10%GLI, EPCA10%GLI)

En el termograma representativo DSC del bioplástico de carragenina con 10% de glicerol (CA10%GLI) de la Figura 34, el primer evento endotérmico se da entre 40°C – 125°C con pico en 88.37 °C y 350.78 J/g. Esta transición se asigna a efecto térmico de deshidratación y evaporación de la humedad de la muestra. La segunda curva es exotérmica y está relacionada a la degradación principal del polisacárido que implica la descomposición de los azúcares en los restos de la carragenina, que se da alrededor de 205 °C.

El termograma mostrado en la Figura 35 de los films elaborados con la mezcla entre carragenina, *E. pachanoi* y glicerol (EPCA10%GLI), muestra que se incrementa la temperatura de fusión de 88.37 °C a 93.40 °C con la inclusión de *E. pachanoi*, esto podría deberse al alto nivel de interacción entre la carragenina y el mucílago de cactus que crea una película más estable y por lo tanto, requiere una mayor energía de activación para la fusión de los cristalitas en el film. Resultados similares se pueden observar en el estudio de Sedayu et al [133] que estudia los efectos del aumento de concentración de glicerol en films de carragenina y también en los estudios realizados en films basados en gelatina y almidón de papa por Van Soest et al [134] y Rezaei et al [135].

Los termogramas de ambos films, Figuras 34 y 35, mostraron picos exotérmicos por encima del rango de fusión. La degradación del polisacárido en la mezcla con el mucílago de cactus se inicia en 178°C, que es menor a la temperatura inicial de degradación de los films sin el mucílago del cactus (195°C), mientras que, en el polvo de mucílago de cactus, el segundo pico es endotérmico a 137.9 °C, como se puede observar en la Figura 24.

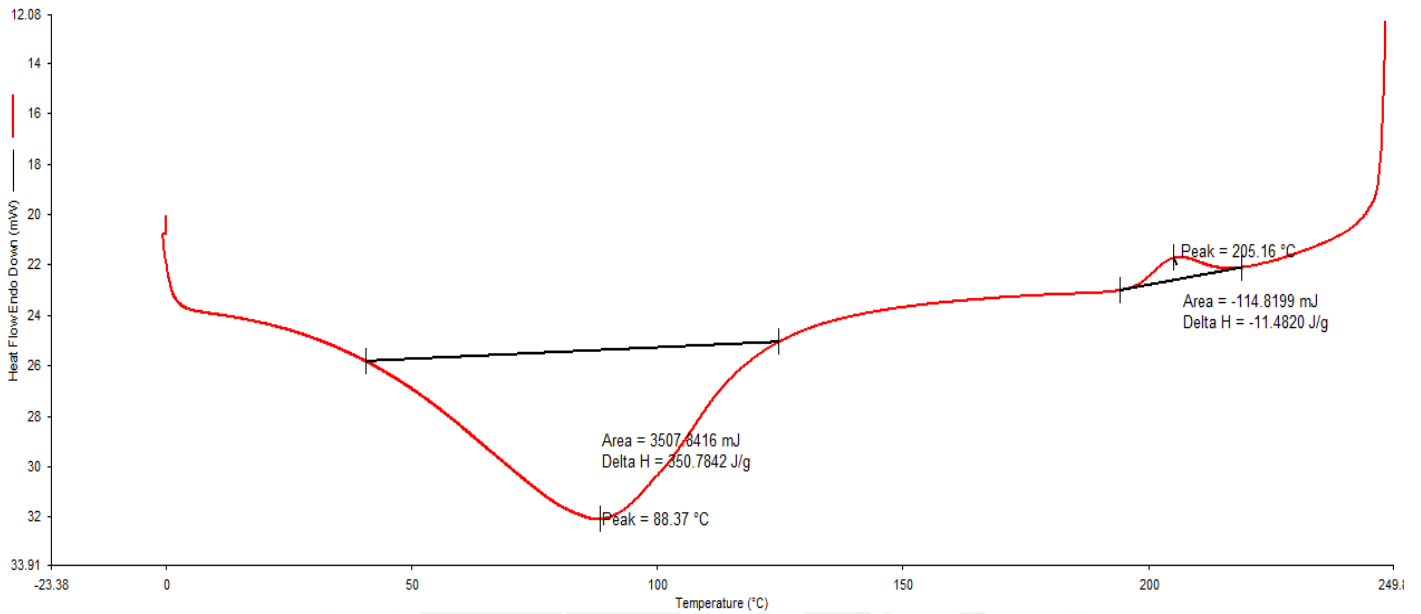


Figura 34. Termograma DSC representativo de films de carragenina (CA10%GLI).

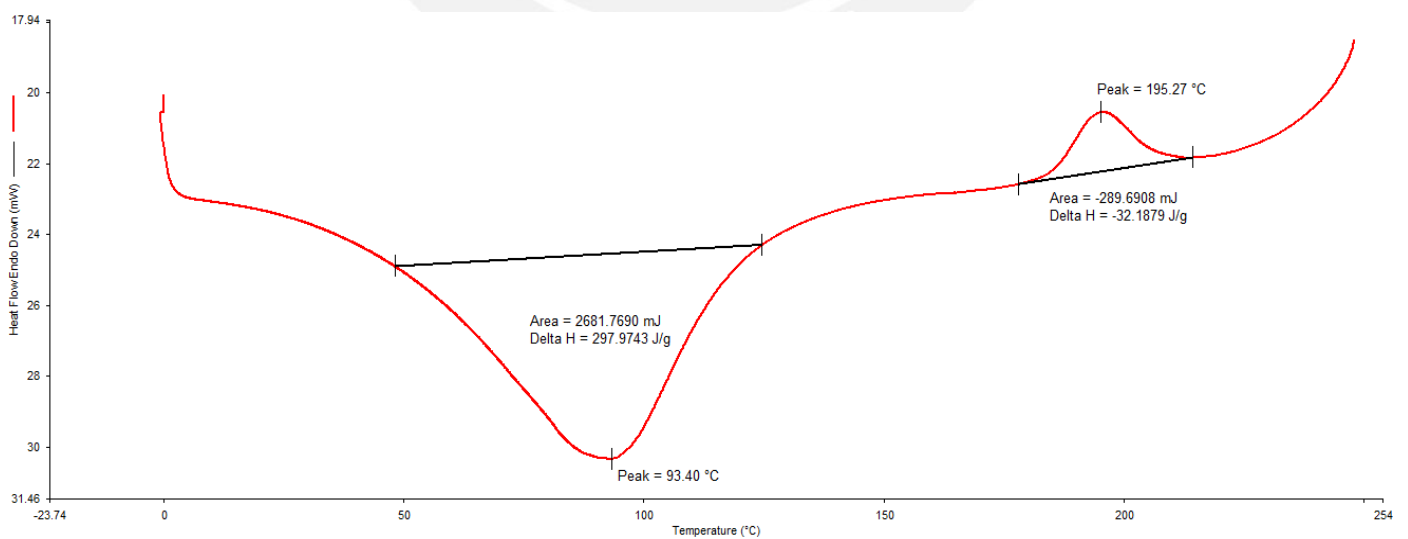


Figura 35. Termograma DSC representativo de films de la mezcla de *E. pachanoi* y carragenina (EPCA10%GLI).

3.3.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

Films de *E. pachanoi* y ulvan (UL10%GLI, EPUL10%GLI)

La pérdida de masa debido a la humedad en los films de ulvan fue de 20.95%, mientras que en los films de la mezcla de ulvan con el mucílago de cactus fue de 17.04%. Esto se relaciona a los grupos funcionales OH de los polisacáridos. Ver Figuras 36 y 37.

En la segunda degradación se da una pérdida de masa de 18.31% y 17.83% en el film de ulvan y la mezcla de ulvan y el cactus, respectivamente; esta degradación se da entre 180 y 290°C. Esto podría ser atribuido a la degradación del material y ruptura de las ramificaciones. La masa residual en el bioplástico de ulvan fue de 16%, mientras que en la mezcla la masa residual fue mayor, de 23.30%.

La comparación de los termogramas TGA de los films de ulvan vs la mezcla de ulvan y *E. pachanoi* se puede ver en la Figura 38.

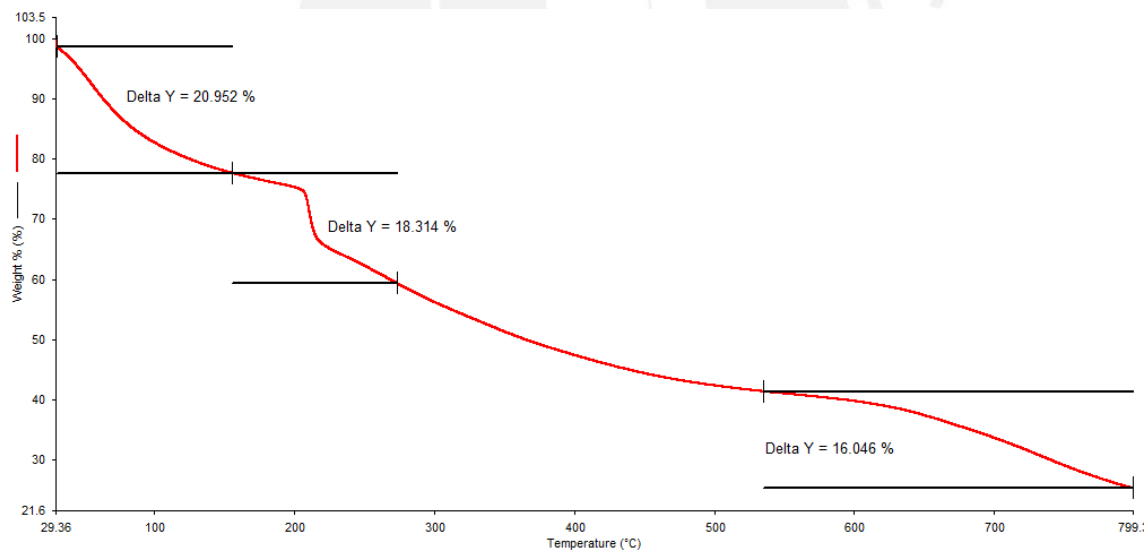


Figura 36. Termograma representativo TGA de los films de ulvan (UL10%GLI).

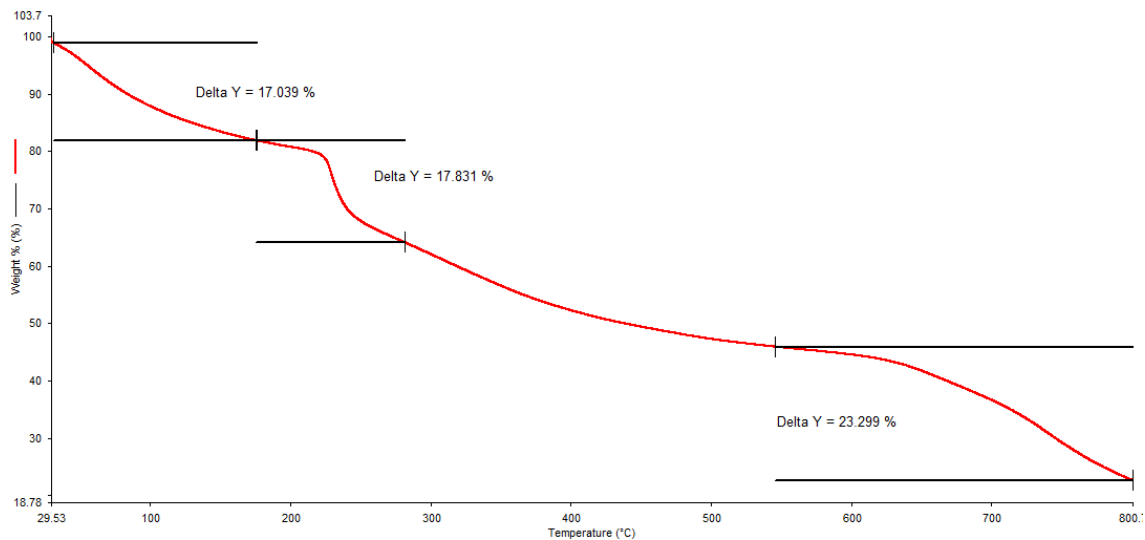


Figura 37. Termograma representativo TGA de los films de la mezcla de ulvan y *E. pachanoi* (EPUL10%GLI).

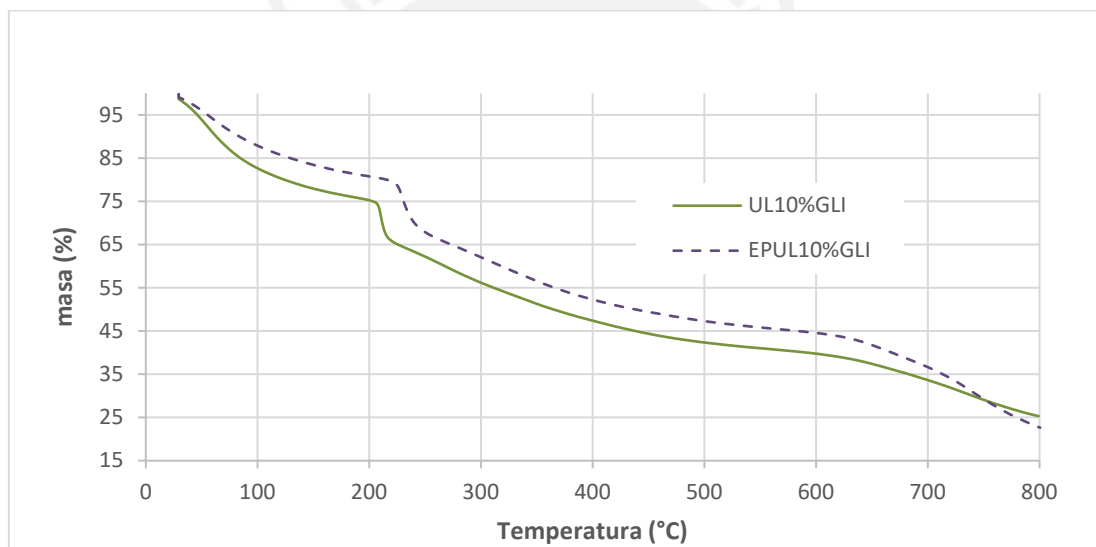


Figura 38. Comparación de termogramas TGA de los films de ulvan y la mezcla de ulvan y *E. pachanoi*.

Films de *E. pachanoi* y carragenina

Según los resultados de los termogramas (Figura 39 y 40), la primera pérdida de masa en los films tiene relación con el contenido de humedad. En los films de carragenina fue de 15.04%, mientras que en los films de la mezcla de carragenina con mucílago de cactus fue de 15.78%; esto tiene relación a los grupos funcionales OH de los polisacáridos.

En la segunda degradación se da una pérdida de masa de 25.92% y 26.2% en el bioplástico de carragenina y la mezcla de carragenina y el cactus, respectivamente; esta degradación se da entre 180 y 340°C, esto podría ser atribuido a la degradación del material y ruptura de las

ramificaciones. La masa residual en el bioplástico de carragenina (19%), mientras que en la mezcla de *E. pachanoi* y carragenina la masa residual es menor (13.6%).

La comparación de termogramas TGA de los films de carragenina vs la mezcla de carragenina y *E. pachanoi* se puede ver en la Figura 41.

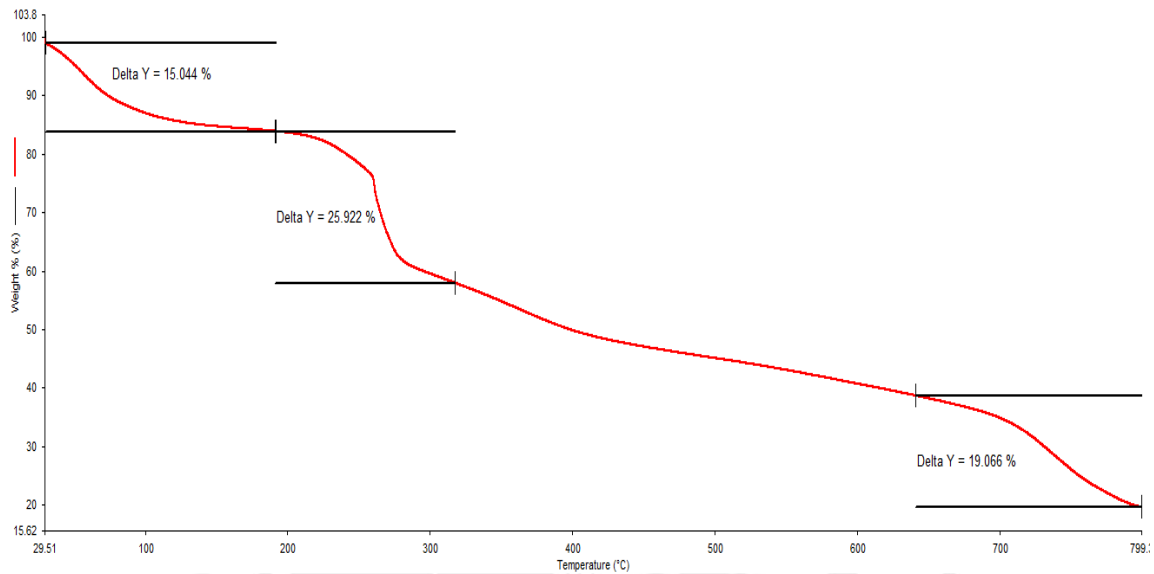


Figura 39. Termograma representativo TGA de los films de carragenina (CA10%GLI).

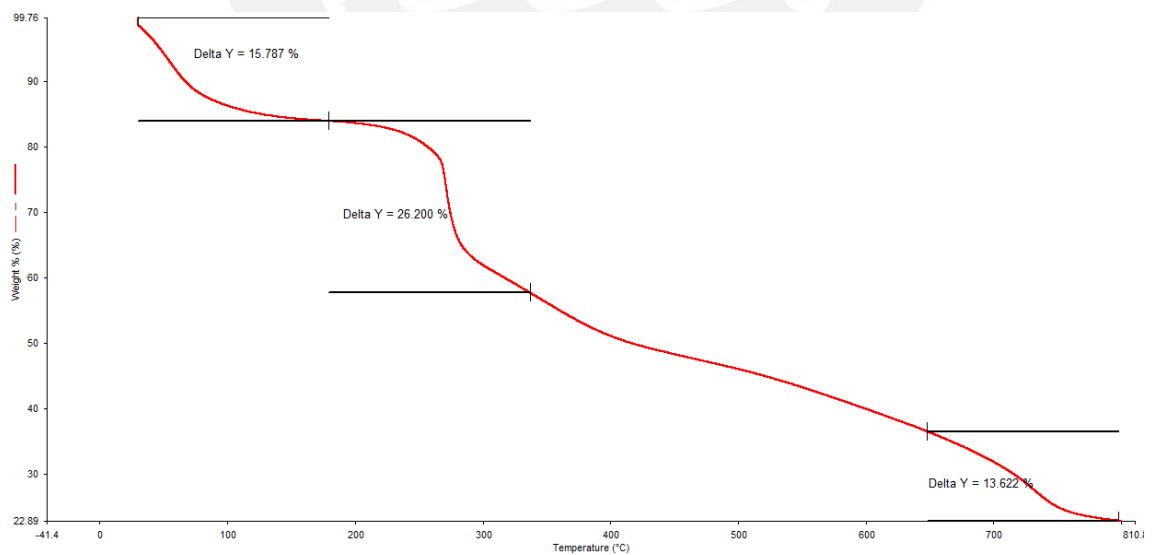


Figura 40. Termograma representativo TGA de los films de la mezcla de carragenina y *E. pachanoi* (EPCA10%GLI).

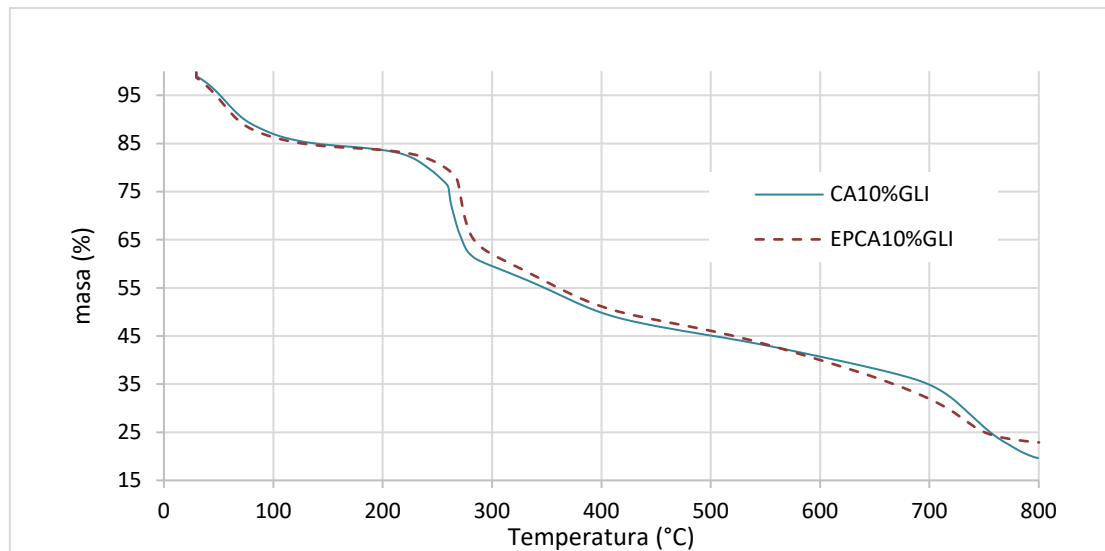


Figura 41. Comparación de termogramas TGA de los films de carragenina y la mezcla de carragenina y *E. pachanoi*.

3.3.5 Caracterización mecánica – Ensayos a Tracción

La Tabla 6 resume los resultados de ensayos a tracción de los films elaborados a partir de las mezclas entre *E. pachanoi*, ulvan y carragenina.

Tabla 5. Resultados ensayos a tracción de los films

Tipo de film	Módulo Elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Elongación máxima (%)
UL10%GLI	571.84 ± 47.83	11.58 ± 1.36	13.63 ± 4.84
EPUL10%GLI	2022.52 ± 108.65	23.47 ± 4.12	3.24 ± 0.57
CA10%GLI	234.55 ± 32.39	16.09 ± 1.87	50.78 ± 2.43
EPCA10%GLI	115.03 ± 23.15	6.58 ± 0.50	31.24 ± 3.29

En el caso del ulvan, el film con glicerol produce un módulo elástico de 571.84 MPa, resistencia a tracción de 11.58 MPa y una elongación máxima de 13.63 %. Incluir mucílago de *E. pachanoi* a la mezcla produce un film con mayor módulo elástico, 2022.52 MPa, lo que significa un aumento del 254% (mayor rigidez en el film). Asimismo, mejora la resistencia a tracción, pues resulta en 23.47 MPa que es casi el 100% respecto del film sin mucílago. Asimismo, la elongación máxima 3.24% se ve reducida en un 76%. La mejora en la resistencia y el aumento de rigidez en el film se debe, posiblemente, a que ambos polisacáridos tienen presente en su estructura molecular

unidades de ramnosa [136]; esta situación elevaría la afinidad en la mezcla, generando mayor densidad y rigidez.

Los valores de resistencia obtenidos son mayores a los films elaborados por Guidara et al [128] con *Ulva lactuca* que fue de 3.5 MPa al 3% de polisacárido y 1% de glicerol; valor que está por debajo de los resultados del presente estudio. Por otro lado, los films elaborados por Ganesan et al [136] con ulvan extraído de *Ulva fasciata*, obtenidos mediante el mezclado del ulvan, en ácido acético y glicerol al 30% tuvo valores de 36.78 MPa; valor por encima de lo hallado en el presente estudio (11.58 MPa). Asimismo, la elongación máxima es de 7.98 %, mientras que en el presente estudio es de 13.63%. Además, Ganesan reporta que al mezclar ulvan con carragenina obtenida de la especie *Kappaphycus alvarezii* mejora la resistencia a tracción, que pasa de 36.78 a 49.12 MPa y la elongación máxima también crece, a 11.02 %.

En el caso de los films de carragenina y glicerol los resultados del módulo de elasticidad, resistencia a tracción y elongación máxima fueron 234.55 MPa, 16.09 MPa y 50.78% respectivamente. Incluir el mucílago de *E. pachanoi* en la elaboración de la mezcla, redujo al 50% el módulo de elasticidad (115.03 MPa) respecto del film de carragenina, es decir genera mayor ductilidad en el film. Del mismo modo, reduce la resistencia a tracción a casi al 40% (6.58 MPa). La elongación máxima, 31.24%, muestra una reducción al 60% del film sin mucílago. Este comportamiento indicaría que el cactus estaría funcionando como un plastificante.

Los valores del módulo elástico y resistencia de los films de carragenina son similares a los obtenidos por Paula et al [115], en films de κ -carragenina, pues tienen 218.5 MPa y 11.42 MPa respectivamente, para films al 2.5% y 25% de glicerol. Sin embargo, la elongación máxima fue solo 2.33%. Del mismo modo, Paula et al observa que el módulo elástico disminuye a la mitad en films a base de mezclas de la κ -carr e ι -carr y también mezclas de ι -carr con alginatos; en el caso de la resistencia del primero disminuye en 20% y, en el caso de la mezcla con alginatos, disminuye en 60%. La elongación máxima aumenta en un 30% y 170% respectivamente.

McHugh & Krochta [137], en el estudio acerca el uso de sorbitol vs glicerol como plastificantes en la fabricación de films de proteína de trigo, mencionan que el incremento de glicerol provoca un incremento de permeabilidad de oxígeno; asimismo, genera la reducción de la resistencia a tracción e incremento de la elongación. Los plastificantes, son en general sustancias con bajo peso molecular que intercalan y dispersan la red de polímeros que rompen enlaces de hidrógeno y dispersan las cadenas de polímeros, de ese modo se incrementa la flexibilidad del film. Similar comportamiento reportó la presente investigación al mezclar el *E. pachanoi* con carragenina, por lo que se sugiere que el cactus estaría produciendo un efecto plastificante. La literatura

también menciona que las propiedades mecánicas los films basados en algas son muy sensibles al tipo de alga que produce el polímero, la concentración y al plastificante que se incluye.

A continuación, se pueden ver las gráficas representativas de esfuerzo deformación unitaria de los films UL10%GLI en la Figura 42, EPUL10%GLI en la Figura 43, CA10%GLI en la Figura 44 y EPCA10%GLI en la Figura 45.

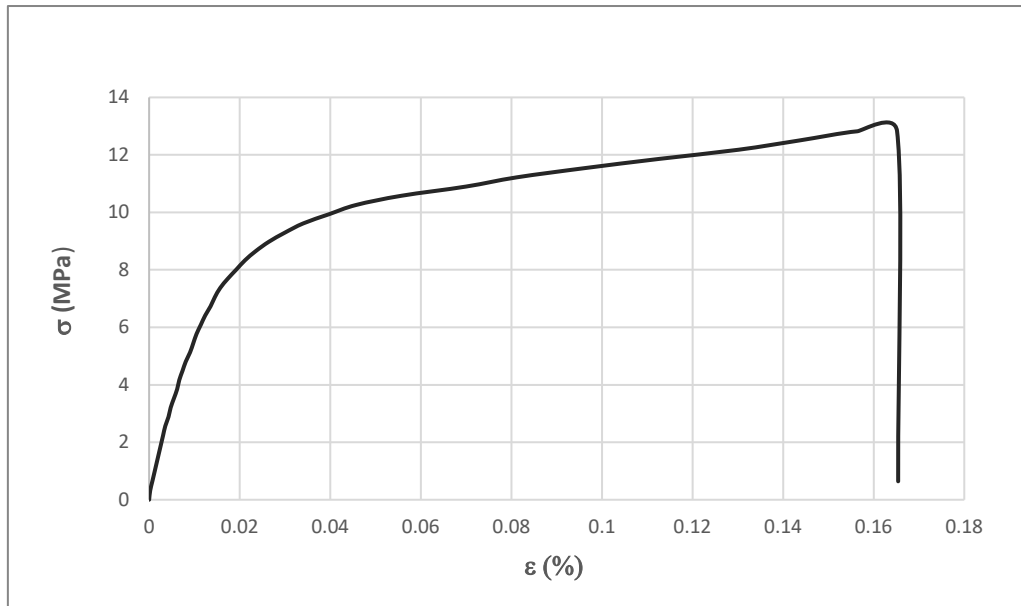


Figura 42. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films UL10%GLI.

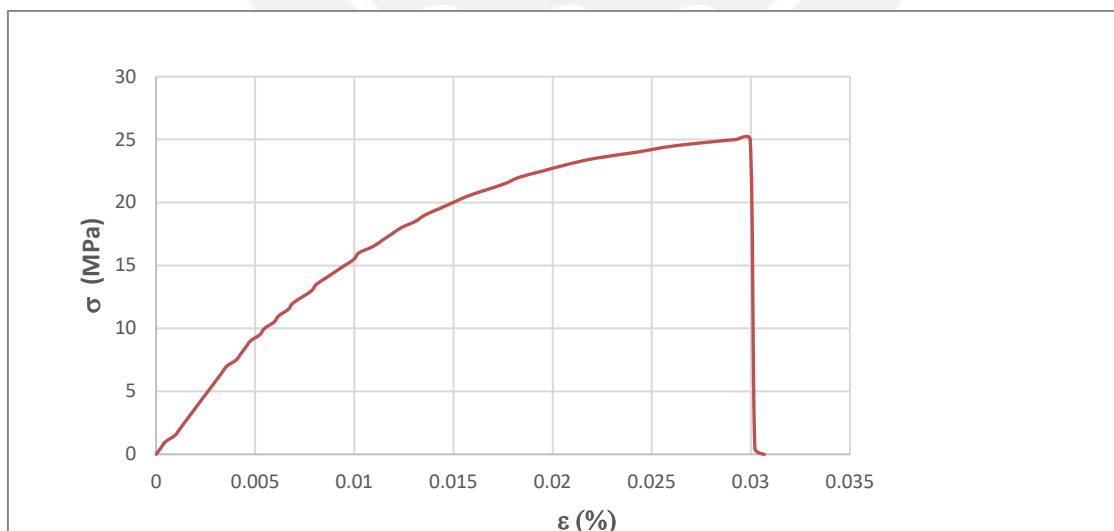


Figura 43. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films EPUL10%GLI.

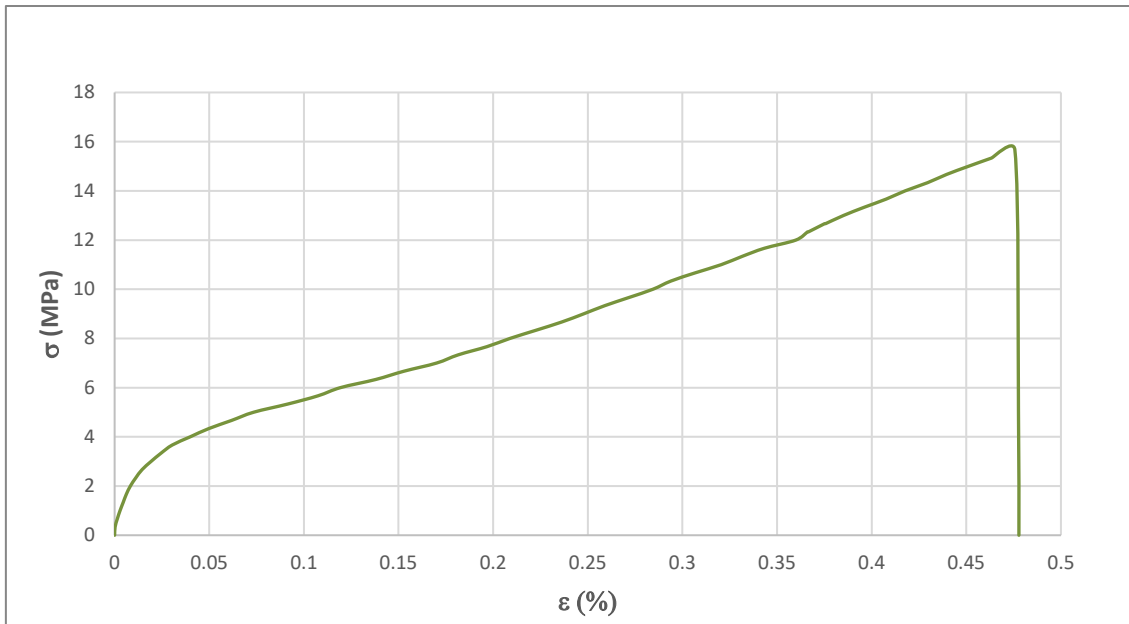


Figura 44. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films CA10%GLI.

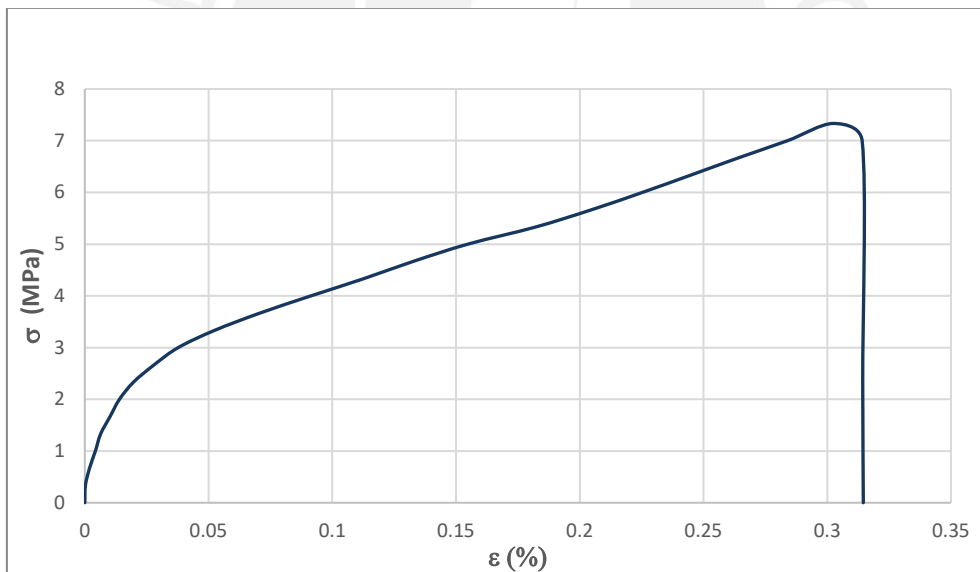


Figura 45. Gráfica representativo esfuerzo – deformación unitaria de los films EPCA10%GLI.

3.3.6 Caracterización morfológica – AFM

En las imágenes AFM de la Figura 46 se observa que el film de ulvan UL10%GLI la rugosidad es significativamente menor al del de solo carragenina CA10%GLI. Por otro lado, la rugosidad se reduce levemente en el caso al agregar el mucílago de *E. pachanoi* (Ver Figura 46a y 46b).

En el caso de los films de CA10%GLI (Ver Figura 46c) se observa una superficie amorfa y rugosa; además, la adición del mucílago del cactus (EPCA10%GLI) produce la reducción de la rugosidad en la superficie del film (Ver Figura 46d). Esto podría obedecer a un efecto plastificante que reduce las fuerzas intermoleculares entre las cadenas poliméricas por lo que la rugosidad decrece mostrando flexibilidad y suavidad, como en el caso de ensayos de films de carragenina con plastificantes realizado por Farhan & Hani [138].

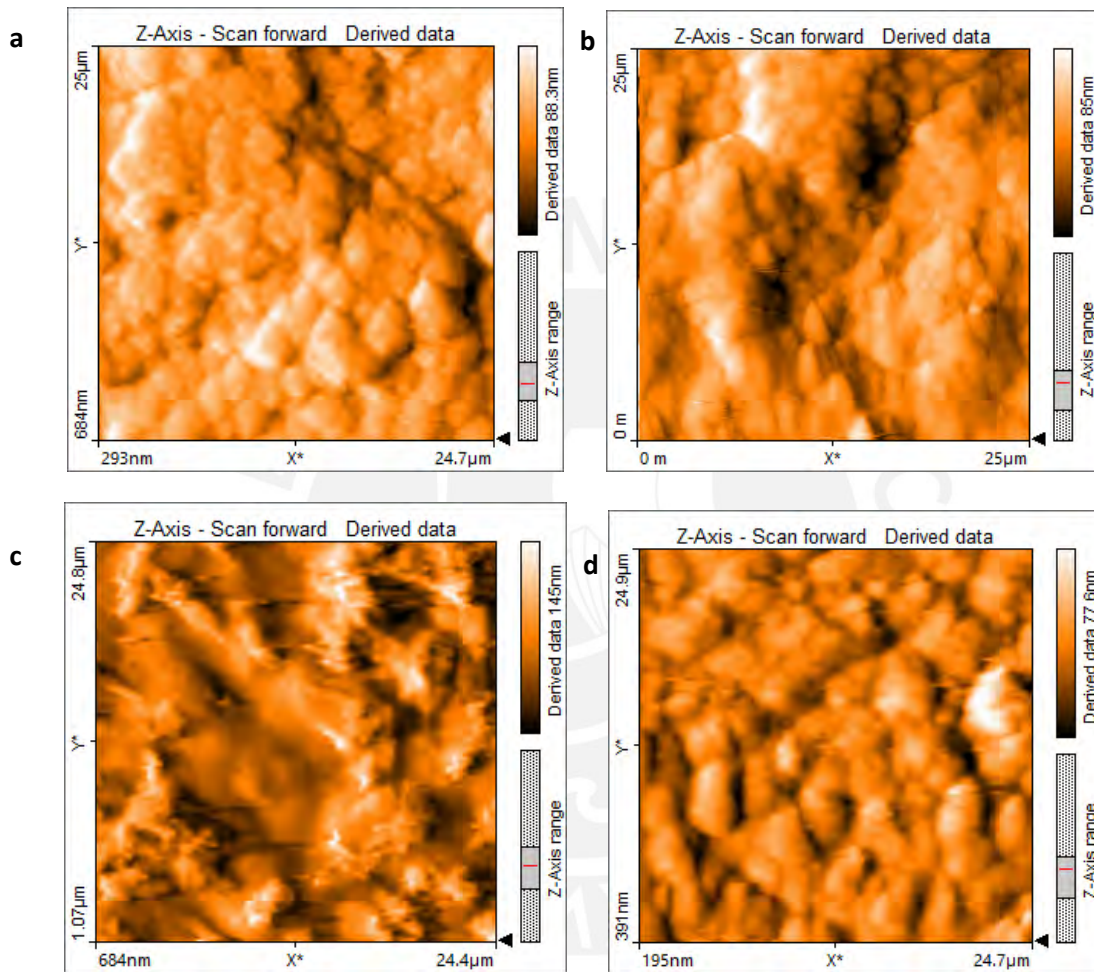


Figura 46. Imágenes de microscopía de fuerza atómica de los films. (a) UL10%GLI, (b) EPUL10%GLI. (c) CA10%GLI, (d) EPCA10%GLI, en imágenes de 25 µm x 25 µm.

CONCLUSIONES

Se elaboraron films de las mezclas del mucílago de *E. pachanoi* con ulvan y carragenina extraídas de las algas *Ulva nematoidea* y *Chondracanthus chamissoi* utilizando glicerol como plastificante. No se llegaron a formar films utilizando solo mucílago de *E. pachanoi*; el material resultó ser frágil.

En los estudios térmicos de los films, el mucílago de *E. pachanoi* influye en la estabilidad térmica de los mismos, pues aumenta la temperatura del inicio de la degradación del polisacárido y la temperatura de fusión se retarda respecto a los films de solo ulvan y de solo carragenina. En el caso de los films de ulvan aumenta de 183°C a 190°C y en los de carragenina de 88.37 °C a 93.40 °C, por lo que se puede decir que el *E. pachanoi* genera films térmicamente más estables.

Además, el mucílago de *E. pachanoi* influyó notoriamente en las propiedades mecánicas de los films. En el caso de la mezcla con ulvan, se obtuvo un material más rígido, pues el módulo elástico de 571.84 MPa a 2022.52 MPa, lo que significa un aumento del 254%. Del mismo modo, la resistencia a tracción pasó de 11.58 MPa a 23.47 MPa, es decir, creció en casi 100%; la elongación se redujo, de 13.63% a 3.24%. El comportamiento observado, se debe, posiblemente, a la afinidad entre el ulvan y el mucílago debido a la presencia de ramnosa en ambas estructuras. En el caso de los films basados en carragenina, el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción se reducen casi a la mitad, de 234.55 MPa a 115.03MPa y de 16.09 MPa a 6.58MPa, respectivamente, por lo que se puede decir que su rigidez se reduce y el *E. pachanoi* actuaría como plastificante cuando se mezcla con carragenina. La elongación máxima disminuyó, de 50.78% a 31.24%. Por otro lado, los films basados en carragenina presentaron clústeres y alta opacidad; además, a mayor cantidad de glicerol, se produjo mayor densidad de clústeres. El origen de los clústeres podría ser una gelificación temprana debido a una alta temperatura de transición espiral-hélice o contaminación por sales. Según la literatura, los clústeres producen la reducción de la resistencia y deformación ante esfuerzos.

De acuerdo a la caracterización morfológica (estudios AFM), se observó que los films, producto de la mezcla entre el mucílago de *E. pachanoi* y ulvan no produjo mayor cambio en la rugosidad respecto de los films basados solo en ulvan. En cambio, los films fabricados con mucílago *E. pachanoi* y carragenina presentaron menor rugosidad menor respecto de los films basados solo en carragenina.

En cuanto a la obtención extracción del polvo de mucílago *E. pachanoi*, se obtuvo un protocolo de extracción y se logró un rendimiento del 0.25%, que es un rendimiento promedio según la literatura.

En cuanto a la estructura del *E. pachanoi*, mediante FTIR se confirmó que es la típica en cactus; además, se verificó que el tratamiento de calor (60-80°C) en la extracción del polvo de mucílago no la modifica. Los estudios térmicos y estructurales realizados al polvo de mucílago del *E. pachanoi*, evidenciaron su naturaleza hidrofílica. En el ensayo TGA, el 12% de su peso está relacionado a la humedad. Además, presenta un alto contenido inorgánico, pues la masa residual a 800°C fue el 30%.

En el análisis DSC se observaron dos eventos térmicos. El primero alrededor de 55°C, que se relaciona a la degradación del polisacárido debido a la ruptura de las ramificaciones, lo que sería la temperatura de fusión debido al carácter semicristalino del mucílago. El segundo evento, con pico en 137.90°C, según la literatura, podría atribuírsele a la interacción hidrófoba entre las moléculas del polvo o a diferentes formas cristalográficas, es decir heterogeneidad en la composición. El estudio de la reología del gel del *E. pachanoi* dio como resultado un comportamiento predominantemente elástico; asimismo, presentó el comportamiento de deformación reversible (*reversible stress softening*), dado que la deformación no produjo una alteración permanente al retirar el esfuerzo. Según la literatura, podría ser que las fibras del tejido se pandeen sin llegar a colapsar o que los enlaces se destruyeran y se formaron nuevamente al retirar la carga.

Los resultados del presente trabajo indican que las mezclas de *E. pachanoi* con carragenina o ulvan son compatibles y generan films estables. Se requiere avanzar con los estudios para que el mucílago de cactus pueda abrirse paso para ser utilizado en el área de recubrimientos comestibles y otros usos.

RECOMENDACIONES

- A. Con el fin de avanzar con el estudio de bioplásticos elaborados con *E. pachanoi*, ulvan y carragenina extraída del litoral peruano para usos relacionados a alimentos, farmacia o construcción, se recomienda lo siguiente:
- B. Estudiar la solubilidad en agua de los films, así como la permeabilidad al vapor de agua mediante métodos gravimétricos, propiedades ópticas para determinar la opacidad o transparencia, mediante el ensayo con espectrofotómetro y determinar el color mediante colorímetro.

- C. Estudiar la influencia de los films en la oxidación de los alimentos sería importante para avanzar con la investigación para el uso de estos tipos films como recubrimiento de alimentos.
- D. Analizar el origen y consecuencias de los clústeres en los films de carragenina y su relación con el aumento de plastificante.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Zampetakis, "CACTUS BASED SOLIDS," University of Bristol , Bristol, 2019.
- [2] M. G. A. Vieira, M. A. Da Silva, L. O. Dos Santos, and M. M. Beppu, "Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review," *Eur. Polym. J.*, vol. 47, no. 3, pp. 254–263, Mar. 2011.
- [3] E. F. Anderson, *The Cactus Family*. 2001.
- [4] B. K. Cassels and P. Saéz-Briones, "Dark Classics in Chemical Neuroscience: Mescaline," *ACS Chem. Neurosci.*, 2018.
- [5] J. Poisson, "Presence of mescaline in a Peruvian Cactaceae," *Ann. Pharm. Fr.*, vol. 18, pp. 764–765, Oct. 1960.
- [6] S. Agurell, J. G. Bruhn, J. Lundstrom, and U. Svensson, "Alkaloids of Trichocereus Species and Some Other Cacti," *Lloydia*, vol. 34, no. 2, pp. 183–187, 1971.
- [7] CITES Perú. Ministerio del Ambiente., "'El San Pedro' o 'Achuma'. El género Echinopsis, Taxonomía, distribución y comercio," Lima, 2013.
- [8] Y. Kita, "The functions of vegetable mucilage in lime and earth mortars - A Review," in *Conference: 3rd Historic Mortars Conference HMC13*, 2013, p. 6.
- [9] C. Sáenz, E. Sepúlveda, and B. Matsuhiro, "Opuntia spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives," *J. Arid Environ.*, vol. 57, no. 3, pp. 275–290, 2004.
- [10] G. Das *et al.*, "Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential biopharmacological properties. Phytotherapy Research," *Phyther. Res.*, vol. 1, no. 36, 2020.
- [11] L. M. K. Saag, G. R. Sanderson, P. Moyna, and G. Ramos, "Cactaceae mucilage composition," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 26, no. 7, pp. 993–1000, 1975.
- [12] A. A. Shetty, M. K. Rana, and S. P. Preetham, "Cactus: A medicinal food," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 49, no. 5, pp. 530–536, Oct. 2012.
- [13] M. M. Tosif *et al.*, "A Comprehensive Review on Plant-Derived Mucilage: Characterization, Functional Properties, Applications, and Its Utilization for Nanocarrier Fabrication," *Polym. 2021, Vol. 13, Page 1066*, vol. 13, no. 7, p. 1066, Mar. 2021.
- [14] F. M. Goycoolea and A. Cárdenas, "Pectins from Opuntia spp.: A short review," *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, vol. 5, no. January 2003, pp. 17–29, 2003.
- [15] E. Sepúlveda, C. Saézn, E. Aliaga, and C. Aceituno, "Extraction and characterization of mucilage in Opuntia spp," *J. Arid Environ.*, vol. 68, pp. 534–545, 2007.
- [16] A. Cárdenas, I. Higuera-Ciapara, and F. M. Goycoolea, "Rheology and Aggregation of Cactus (Opuntia ficus-indica) Mucilage in Solution," *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, vol. 2, no. February, pp. 152–159, 1997.
- [17] L. M. K. Saag, G. R. Sanderson, P. Moyna, and G. Ramos, "Cactaceae Mucilage Composition," *J. Sci. Fd Agric*, vol. 26, pp. 993–1000, 1975.
- [18] E. S. Amin, O. M. Awad, and M. M. El-Sayed, "The mucilage of Opuniia ficus-indica Mill.,"

- Carbohydr. Res.*, vol. 15, no. 1, pp. 159–161, 1970.
- [19] F. C. Stintzing and R. Carle, "Review Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses," *Mol. Nutr. Food Res*, vol. 49, pp. 175–194, 2005.
- [20] S. Trachtenberg and A. M. Mayer, "Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage," *Phytochemistry*, vol. 20, no. 12, pp. 2665–2668, 1981.
- [21] S. Rodríguez-González *et al.*, "Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*," *J. Food Process Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 285–292, 2014.
- [22] K. Trout, "Pachanoi or pachanot?," 2018.
- [23] C. Ostolaza, *101 Cactus del Perú*, Ministerio. Lima, 2011.
- [24] S. Albesiano and R. Kiesling, "Identity and neotypification of *Cereus macrogonus*, the type species of the genus *Trichocereus* (Cactaceae)," *Haseltonia*, no. 17, pp. 24–34, 2012.
- [25] G. K. Jani, D. P. Shah, V. D. Prajapatia, and V. C. Jain, "Gums and mucilages: Versatile excipients for pharmaceutical formulations," *Asian J. Pharm. Sci.*, vol. 4, no. 5, pp. 309–323, 2009.
- [26] R. Gheribi, M. A. Gharbi, M. El Ouni, and K. Khwaldia, "Enhancement of the physical, mechanical and thermal properties of cactus mucilage films by blending with polyvinyl alcohol," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 22, 2019.
- [27] É. de Andrade Vieira *et al.*, "Mucilages of cacti from Brazilian biodiversity: Extraction, physicochemical and technological properties," *Food Chem.*, vol. 346, Jun. 2021,
- [28] A. Allegra, P. Inglese, G. Sortino, L. Settanni, A. Todaro, and G. Liguori, "The influence of *Opuntia ficus-indica* mucilage edible coating on the quality of 'Hayward' kiwifruit slices," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 120, pp. 45–51, 2016.
- [29] D. R. Olicón-Hernández, Á. Acosta-Sánchez, R. Monterrubio-López, and G. Guerra-Sánchez, "Chitosan and *Opuntia ficus-indica* mucilage as the base of a polymeric edible film for the protection of tomatoes against *Rhizopus stolonifer*," *TIP Rev. Espec. en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 22, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [30] R. Gheribi and K. Khwaldia, "Cactus mucilage for food packaging applications," *Coatings*, vol. 9, no. 10, pp. 1–19, 2019.
- [31] M. T. F. de Souza *et al.*, "Extraction and use of *Cereus peruvianus* cactus mucilage in the treatment of textile effluents," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 67, pp. 174–183, Oct. 2016.
- [32] X. Vecino, R. Devesa-Rey, D. M. de Lima Stebbins, A. B. Moldes, J. M. Cruz, and N. A. Alcantar, "Evaluation of a cactus mucilage biocomposite to remove total arsenic from water," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 6, pp. 69–79, 2016.
- [33] F. M. León-Martínez, P. F. d. J. Cano-Barrita, F. Castellanos, K. B. Luna-Vicente, S. Ramírez-Arellanes, and C. Gómez-Yáñez, "Carbonation of high-calcium lime mortars containing cactus mucilage as additive: a spectroscopic approach," *J. Mater. Sci.*, vol. 56, no. 5, pp. 3778–3789, Feb. 2021.

- [34] C. Alisi *et al.*, "Mucilages from Different Plant Species Affect the Characteristics of Bio-Mortars for Restoration," *Coatings 2021, Vol. 11, Page 75*, vol. 11, no. 1, p. 75, Jan. 2021.
- [35] F. M. León-Martínez, P. F. D. J. Cano-Barrita, L. Lagunez-Rivera, and L. Medina-Torres, "Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, no. April 2018, pp. 190–202, 2014.
- [36] L. Medina-Torres, E. Brito-De La Fuente, B. Torrestiana-Sanchez, and R. Katthain, "Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*)," *Food Hydrocoll.*, vol. 14, no. 5, pp. 417–424, 2000.
- [37] F. M. León-Martínez, L. L. Méndez-Lagunas, and J. Rodríguez-Ramírez, "Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization," *Carbohydr. Polym.*, vol. 81, no. 4, pp. 864–870, 2010.
- [38] A. C. Gibson and P. S. Nobel, *The Cactus Primer*. Harvard University Press, 1986.
- [39] G. Goldstein, J. Andrade, and P. Nobel, "Differences in Water Relations Parameters for the Chlorenchyma and the Parenchyma of *Opuntia ficus-indica* Under Wet Versus Dry Conditions," *Aust. J. Plant Biol.*, vol. 18, no. 2, p. 95, 1991.
- [40] D. McGarvie and H. Parolis, "The mucilage of *Opuntia ficus-indica*," *Carbohydr. Res.*, vol. 69, no. 1, pp. 171–179, 1979.
- [41] A. Lynn Buttice, "Aggregation of Sediment and Bacteria with Mucilage from the *Opuntia ficus-indica* Cactus," University of South Florida, 2012.
- [42] D. McGarvie and H. Parolis, "Methylation analysis of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*," *Carbohydr. Res.*, vol. 88, no. 2, pp. 305–314, Feb. 1981.
- [43] D. McGarvie and H. Parolis, "The acid-labile, peripheral chains of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*," *Carbohydr. Res.*, vol. 94, no. 1, pp. 57–65, Jul. 1981.
- [44] E. Zavala-Mendoza, "Optimización del proceso de extracción del mucilago de cinco especies de *Opuntia* (L.) Miller de Michoacán," 2012.
- [45] B. K. Srivastava and C. S. Pande, "Arabinogalactan from the pods of *Opuntia dillenii*," *Planta Med.*, vol. 25, no. 1, pp. 92–97, 1974.
- [46] C. Sáenz and E. Sepúlveda, "Alternatives of industrialization of prickly pear," *Alimentos*, 1993.
- [47] M. A. Abraján Villaseñor, "Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucilago del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible," UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, Valencia, 2008.
- [48] W. CAI, X. GU, and J. TANG, "Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*," *Carbohydr. Polym.*, vol. 71, pp. 403–410, 2007.
- [49] H. Majdoub, L. Picton, D. Le Cerf, and S. Roudesli, "Water Retention Capacity of

- Polysaccharides from Prickly Pear Nopals of *Opuntia Ficus Indica* and *Opuntia Litoralis*: Physical-Chemical Approach," *J. Polym. Environ.*, vol. 18, no. 4, pp. 451–458, 2010.
- [50] S. Rodríguez-González, H. E. Martínez-Flores, J. L. Órnelas-Nuñez, and M. G. Garnica-Romo, "Optimización de la extracción del mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica*)," 2011.
- [51] S. E. Harding *et al.*, "Biopolymer Mucoadhesives," *Biotechnol. Genet. Eng. Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 41–86, Apr. 1999.
- [52] L. Diamante and M. Umemoto, "Rheological properties of fruits and vegetables: A review," *Int. J. Food Prop.*, vol. 18, no. 6, pp. 1191–1210, 2015.
- [53] D. T. N. Chen, Q. Wen, P. A. Janmey, J. C. Crocker, and A. G. Yodh, "Rheology of Soft Materials," *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, vol. 1, pp. 301–322, 2010,
- [54] D. R. Picout and S. B. Ross-Murphy, "Rheology of Biopolymer Solutions and Gels," vol. 3, pp. 105–121, 2003.
- [55] H. Dogan and J. L. Kokini, "Rheological properties of foods," in *Handbook of Food Engineering*, Second Edi., no. November, CRC Press, 2006, pp. 1–124.
- [56] T. G. Mezger, "8. Oscillatory tests," *The Rheology Handbook*. pp. 135–212, 2019.
- [57] R. Ndjouenkeu, F. M. Goycoolea, E. R. Morrissa, and J. O. Akingbala, "Rheology of okra (*Hibiscus esculentus* L.) and dika nut (*Irvingia gabonensis*) polysaccharides," *Carbohydr. Polym.*, vol. 29, no. 3, pp. 263–269, 1996.
- [58] J. T. Kidgell, M. Magnusson, R. de Nys, and C. R. K. Glasson, "Ulvan: A systematic review of extraction, composition and function," *Algal Res.*, vol. 39, no. January, p. 101422, 2019.
- [59] N. Wahlström *et al.*, "Composition and structure of cell wall ulvans recovered from *Ulva* spp. along the Swedish west coast," *Carbohydr. Polym. J.*, vol. 233, 2020.
- [60] M. Lahaye and A. Robic, "Structure and Functional Properties of Ulvan, a Polysaccharide from Green Seaweeds," *Biomacromolecules*, vol. 8, no. 6, pp. 1765–1774, 2007.
- [61] B. Quemener, M. Lahaye, and C. Bobin-Dubigeon, "Sugar determination in ulvans by a chemical-enzymatic method coupled to high performance anion exchange chromatography," *J. of Applied Phycol.* 9, vol. 9, pp. 179–188, 1997.
- [62] A. Robic, D. Bertrand, J. F. Sassi, Y. Lerat, and M. Lahaye, "Determination of the chemical composition of ulvan, a cell wall polysaccharide from *Ulva* spp. (Ulvales, Chlorophyta) by FT-IR and chemometrics," *J. Appl. Phycol.*, vol. 21, no. 4, pp. 451–456, 2009.
- [63] N. Arakaki, P. Gil-Kodaka, P. Carbajal, A. Gamarra, and M. E. Ramírez, *Macroalgas de la Costa Central del Perú*. Lima, Perú: UNALM, 2018.
- [64] A. Robic, C. Gaillard, J. F. Sassi, Y. Leral, and M. Lahaye, "Ultrastructure of Ulvan: A polysaccharide from green seaweeds," *Biopolymers*, vol. 91, no. 8, pp. 652–664, 2009.
- [65] A. Ali and S. Ahmed, "Carrageenans: Structure, Properties and Applications," *Mar. Polysaccharides*, vol. 0, pp. 29–52, 2019.

- [66] W. R. Blakemore and A. R. Harpell, "Carrageenan," in *Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents*, Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2010, pp. 73–94.
- [67] J. Necas and L. Bartosikova, "Carrageenan: A review," *Vet. Med. (Praha)*, vol. 58, no. 4, pp. 187–205, 2013.
- [68] H. J. Bixler, "Recent developments in manufacturing and marketing carrageenan," vol. 327, pp. 3–5, 1996.
- [69] P. Wang *et al.*, "Structural and compositional characteristics of hybrid carrageenans from red algae *Chondracanthus chamissoi*," *Carbohydr. Polym.*, vol. 89, no. 3, pp. 914–919, 2012.
- [70] G. DE RUITER *et al.*, "Sulfohydrolases, corresponding amino acid and nucleotide sequences, sulfohydrolase preparations, processes, and products thereof.," 2001.
- [71] S. Chandra, L. Eklund, and R. R. Villarreal, "Use of cactus in mortars and concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 1, pp. 41–51, 1998.
- [72] S. Rescic, M. Mattone, F. Fratini, and L. Luvidi, "Conservation of Earthen Bricks in Architecture : An Experimental Campaign to Test Different Treatments on Vernacular Built Heritage," pp. 1541–1566, 2023.
- [73] A. Cardenas, W. M. Arguelles, and F. M. Goycoolea, "On the possible role of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings," *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, vol. 3, no. January, pp. 64–71, 1998.
- [74] M. Achenza and L. Fenu, "On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction," *Mater. Struct.*, vol. 39, no. 1, pp. 21–27, 2006.
- [75] R. Aguilar *et al.*, "The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 625–637, 2016.
- [76] M. Cappellari, A. Daubresse, and M. Chaouche, "Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 950–961, 2013.
- [77] K. Alrashdi, "Water Regulation for Enhancing Soil Quality Using Cactus Mucilage : A Theoretical and Experimental Analysis," University of South Florida, 2021.
- [78] A. Di Marsico *et al.*, "Mucilage from fruits/seeds of chia (*Salvia hispanica* L.) improves soil aggregate stability," *Plant Soil*, vol. 425, no. 1–2, pp. 57–69, 2018.
- [79] C. Kraus, D. Hirmas, and J. Roberts, "Compressive strength of blood stabilized earthen architecture," *Earthen Archit. Past, Present Futur. - Proc. Int. Conf. Vernac. Heritage, Sustain. Earthen Archit.*, no. September, pp. 217–220, 2015.
- [80] Y. Kulshreshtha *et al.*, "Biological Stabilisers in Earthen Construction: A Mechanistic Understanding of their Response to Water-Ingress," *Bio-Based Build. Mater.*, vol. 1, no. June, pp. 529–539, 2022.
- [81] M. A. dos S. Morais *et al.*, "Mucilage of spineless cactus in the composition of an edible coating for minimally processed yam (*Dioscorea* spp.)," *J. Food Meas. Charact.*, vol. 13,

- no. 3, pp. 2000–2008, 2019.
- [82] M. Espino-Díaz *et al.*, "Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.)," *J. Food Sci.*, vol. 75, no. 6, pp. 347–352, 2010.
- [83] R. Gheribi *et al.*, "Development of plasticized edible films from *Opuntia ficus-indica* mucilage: A comparative study of various polyol plasticizers," *Carbohydr. Polym.*, vol. 190, pp. 204–211, 2018.
- [84] A. A. Lira-Vargas, J. J. E. Corrales-García, S. Valle-Guadarrama, C. B. Peña-Valdivia, and M. A. Trejo-Marquez, "Biopolymeric films based on cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage incorporated with gelatin and beeswax," *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, vol. 16, no. January 2015, pp. 51–70, 2014.
- [85] B. M. Dominguez-Martinez, H. E. Martinez-Flores, J. D. J. Berrios, C. G. Otoni, D. F. Wood, and G. Velazquez, "Physical Characterization of Biodegradable Films Based on Chitosan, Polyvinyl Alcohol and *Opuntia* Mucilage," *J. Polym. Environ.*, vol. 25, no. 3, pp. 683–691, 2017.
- [86] A. Y. Guadarrama-Lezama, J. Castaño, G. Velázquez, H. Carrillo-Navas, and J. Alvarez-Ramírez, "Effect of nopal mucilage addition on physical, barrier and mechanical properties of citric pectin-based films," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 55, no. 9, pp. 3739–3748, 2018.
- [87] F. Scognamiglio, D. M. Gattia, G. Roselli, F. Persia, U. De Angelis, and C. Santulli, "Thermoplastic Starch (TPS) Films Added with Mucilage from *Opuntia Ficus Indica*: Mechanical, Microstructural and Thermal Characterization," *Materials (Basel)*, vol. 13, 2020.
- [88] F. López-García *et al.*, "Physical and chemical characterization of a biopolymer film made with corn starch and nopal xocostle (*Opuntia joconostle*) mucilage," *Rev. Mex. Ing. Química*, vol. 16, no. 1, pp. 147–158, 2017.
- [89] N. L. Oliveira, A. A. Rodrigues, I. C. O. Neves, A. M. T. Lago, S. V. Borges, and J. V. de Resende, "Development and characterization of biodegradable films based on *Pereskia aculeata* Miller mucilage," *Ind. Crops Prod.*, vol. 130, pp. 499–510, Apr. 2019.
- [90] V. Del-Valle, P. Hernández-Muñoz, A. Guarda, and M. J. Galotto, "Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life," *Food Chem.*, vol. 91, no. 4, pp. 751–756, 2005.
- [91] A. C. Oluwaseun, O. F. Samuel, and A. E. Sunday, "Effects of *Opuntia* Cactus Mucilage Extract and Storage under Evaporative Coolant System on the Shelf Life of *Carica papaya* Fruits," *J. Agrobiotechnology*, vol. 5, no. April 2015, pp. 49–66, 2014.
- [92] M. Z. Treviño-Garza, S. García, N. Heredia, M. G. Alanís-Guzmán, and K. Arévalo-Niño, "Layer-by-layer edible coatings based on mucilages, pullulan and chitosan and its effect on quality and preservation of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*)," *Postharvest Biol. Technol. J.*, vol. 128, pp. 63–75, 2017.

- [93] A. Allegra, G. Sortino, P. Inglese, L. Settanni, A. Todaro, and A. Gallotta, "The effectiveness of *Opuntia ficus-indica* mucilage edible coating on post-harvest maintenance of 'Dottato' fig (*Ficus carica* L.) fruit," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 12, pp. 135–141, 2017.
- [94] J. A. Zegbe, J. Mena-Covarrubias, and V. S. I. Domínguez-Canales, "Cactus mucilage as a coating film to enhance shelf life of unprocessed guavas (*Psidium guajava* L.)," *Acta Hortic.*, vol. 1067, no. March, pp. 423–427, 2015.
- [95] A. Bernardino-Nicanor *et al.*, "Spectroscopic and structural analyses of *Opuntia Robusta* mucilage and its potential as an edible coating," *Coatings*, vol. 8, no. 466, pp. 1–11, 2018.
- [96] J. Zambrano, A. Valera, M. Maffei, W. Materano, I. Quintero, and K. Graterol, "Effect of an edible coating prepared with cactus mucilage (*Opuntia elatior* mill.) on quality of minimally processed pineapple," *Bioagro*, vol. 29, no. 2, pp. 129–136, 2017.
- [97] R. Gheribi, Y. Habibi, and K. Khwaldia, "Prickly pear peels as a valuable resource of added-value polysaccharide: Study of structural, functional and film forming properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 126, no. 2019, pp. 238–245, 2019.
- [98] M. S. P. Damas, V. A. Pereira Junior, R. K. Nishihora, and M. G. N. Quadri, "Edible films from mucilage of *Cereus hildmannianus* fruits: Development and characterization," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 134, no. 35, Sep. 2017.
- [99] N. G. Abera, W. Kebede, and M. Wassu, "Effect of Aloe gel and cactus mucilage coating on chemical quality and sensory attributes of mango (*Mangifera indica* L.)," vol. 07, no. 2, pp. 31–43, 2019.
- [100] A. Allegra, A. Gallotta, F. Carimi, F. Mercati, P. Inglese, and F. Martinelli, "Metabolic profiling and post-harvest behavior of 'dottato' fig (*Ficus carica* L.) fruit covered with an edible coating from *O. ficus-indica*," *Front. Plant Sci.*, vol. 9, no. September, pp. 1–10, 2018.
- [101] L. Felkai-Haddache *et al.*, "Conventional and Microwave-Assisted Extraction of Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes: Physico-Chemical and Rheological Properties," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 481–492, 2016.
- [102] D. R. Paul and J. W. Barlow, "Polymer Blends," *J. Macromol. Sci. Macromol. Chem.*, vol. 18, no. 1, pp. 109–168, 1980,
- [103] L. M. Robeson, *Polymer Blends: A Comprehensive Review*. 2007.
- [104] S. A. Rodriguez, E. Weese, J. Nakamatsu, and F. Torres, "Development of Biopolymer Nanocomposites Based on Polysaccharides Obtained from Red Algae *Chondracanthus chamissoi* Reinforced with Chitin Whiskers and Montmorillonite," *Polym. - Plast. Technol. Eng.*, vol. 55, no. 15, pp. 1557–1564, 2016.
- [105] R. Tuvikene, K. Truus, M. Vaher, T. Kailas, G. Martin, and P. Kersen, "Extraction and quantification of hybrid carrageenans from the biomass of the red algae *Furcellaria lumbricalis* and *Coccotylus truncatus*," *Proc. Est. Acad. Sci. Chem.*, vol. 55, no. 1, pp.

- 40–53, 2006.
- [106] M. E. Embuscado and K. C. Huber, *Edible films and coatings for food applications*. New York, NY, USA: Springer, 2009.
- [107] L. R. Camelo Caballero, A. Wilches-Torres, A. Cárdenas-Chaparro, J. A. Gómez Castaño, and M. C. Otálora, "Preparation and physicochemical characterization of softgels cross-linked with cactus mucilage extracted from cladodes of *Opuntia ficus-indica*," *Molecules*, vol. 24, no. 14, 2019.
- [108] M. C. Otálora, A. Wilches-Torres, and J. A. G. Castaño, "Extraction and Physicochemical Characterization of Dried Powder Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves: A Comparative Study," *Polym. 2021, Vol. 13, Page 1689*, vol. 13, no. 11, p. 1689, May 2021.
- [109] K. Nishinari, H. Zhang, and T. Funami, "Curdlan," in *Handbook of Hydrocolloids: Second Edition*, G. O. Phillops and P. A. Williams, Eds. Woodhead Publishing, 2009, pp. 567–591.
- [110] Y. Feng, X. Jin, and J. N. Hay, "Evaluation of multiple melting peaks of propylene-ethylene copolymers," *Polym. J.*, vol. 30, no. 3, pp. 215–221, 1998.
- [111] J. T. Madera-Santana *et al.*, "Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera* Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization," *CyTA-Journal Food*, vol. 16, no. 1, pp. 650–657, 2018.
- [112] F. G. Torres, O. P. Troncoso, D. Lopez, C. Grande, and C. M. Gomez, "Reversible stress softening and stress recovery of cellulose networks," *Soft Matter*, vol. 5, pp. 4185–4190, 2009.
- [113] F. G. Torres, O. P. Troncoso, E. R. Rivas, C. G. Gomez, and D. Lopez, "Reversible stress softening of collagen based networks from the jumbo squid mantle (*Dosidicus gigas*)," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 37, no. 1, pp. 9–13, Apr. 2014.
- [114] B. K. Patel, O. H. Campanella, and S. Janaswamy, "Impact of urea on the three-dimensional structure, viscoelastic and thermal behavior of iota-carrageenan," *Carbohydr. Polym.*, vol. 92, no. 2, pp. 1873–1879, 2013.
- [115] G. A. Paula *et al.*, "Development and characterization of edible films from mixtures of kappa-carrageenan, I-carrageenan, and alginate," *Food Hydrocoll.*, vol. 47, pp. 140–145, May 2015.
- [116] M. Tabarsa, S. G. You, E. H. Dabaghian, and U. Surayot, "Water-soluble polysaccharides from *Ulva intestinalis*: Molecular properties, structural elucidation and immunomodulatory activities," *J. Food Drug Anal.*, vol. 26, no. 2, pp. 599–608, 2018.
- [117] M. A. Coimbra, F. Gonçalves, A. S. Barros, and I. Delgadillo, "Fourier transform infrared spectroscopy and chemometric analysis of white wine polysaccharide extracts," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 50, no. 12, pp. 3405–3411, 2002.
- [118] P. Shao, X. Chen, and P. Sun, *Chemical characterization, antioxidant and antitumor activity of sulfated polysaccharide from *Sargassum horneri**, vol. 105, no. 1. Elsevier Ltd.,

- 2014.
- [119] E. Hernández-Garibay, J. A. Zertuche-González, and I. Pacheco-Ruiz, "Isolation and chemical characterization of algal polysaccharides from the green seaweed *Ulva clathrata* (Roth) C. Agardh," *J. Appl. Phycol.*, vol. 23, no. 3, pp. 537–542, 2011.
- [120] N. Trivedi *et al.*, "An integrated process for the extraction of fuel and chemicals from marine macroalgal biomass," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. July, 2016.
- [121] N. Sari-Chmayssem, S. Taha, H. Mawlawi, J. P. Guégan, J. Jeftić, and T. Benvegnu, "Extracted ulvans from green algae *Ulva linza* of Lebanese origin and amphiphilic derivatives: evaluation of their physico-chemical and rheological properties," *J. Appl. Phycol.*, vol. 31, no. 3, pp. 1931–1946, 2019.
- [122] V. Vásquez, R. Martínez, and C. Bernal, "Enzyme-assisted extraction of proteins from the seaweeds *Macrocystis pyrifera* and *Chondracanthus chamissoi*: characterization of the extracts and their bioactive potential," *J. Appl. Phycol.*, vol. 31, no. 3, pp. 1999–2010, 2019.
- [123] E. Mayta-Huatuco *et al.*, "Extraction and antiviral activity assessment of compounds from *Chondracanthus chamissoi* and *Chlorella peruviana* against serotype 2 dengue virus," *Acta Med Peru*, vol. 37, no. 1, pp. 11–19, 2020.
- [124] L. Pereira, A. Sousa, H. Coelho, A. M. Amado, and P. J. A. Ribeiro-Claro, "Use of FTIR, FT-Raman and ¹³C-NMR spectroscopy for identification of some seaweed phycocolloids," *Biomolecular Eng.*, vol. 20, pp. 223–228, 2003.
- [125] L. Pereira, A. M. Amado, A. T. Critchley, F. van de Velde, and P. J. A. Ribeiro-Claro, "Identification of selected seaweed polysaccharides (phycocolloids) by vibrational spectroscopy (FTIR-ATR and FT-Raman)," *Food Hydrocoll.*, vol. 23, no. 7, pp. 1903–1909, 2009.
- [126] P. Kanmani and J. W. Rhim, "Development and characterization of carrageenan/grapefruit seed extract composite films for active packaging," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 68, pp. 258–266, 2014.
- [127] M. A. Cerqueira, B. W. S. Souza, J. A. Teixeira, and A. A. Vicente, "Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films - A comparative study," *Food Hydrocoll.*, vol. 27, no. 1, pp. 175–184, 2012.
- [128] M. Guidara *et al.*, "Smart ulvan films responsive to stimuli of plasticizer and extraction condition in physico-chemical, optical, barrier and mechanical properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 150, pp. 714–726, 2020.
- [129] E. Sulastri, M. S. Zubair, R. Lesmana, A. F. A. Mohammed, and N. Wathoni, "Development and Characterization of Ulvan Polysaccharides-Based Hydrogel Films for Potential Wound Dressing Applications," *Drug Des. Devel. Ther.*, vol. 15, pp. 4213–4226, 2021.
- [130] L. Cassani *et al.*, "Thermochemical Characterization of Eight Seaweed Species and Evaluation of Their Potential Use as an Alternative for Biofuel Production and Source of

- Bioactive Compounds," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 4, 2022.
- [131] L. A. Tziveleka *et al.*, "Hybrid sponge-like scaffolds based on ulvan and gelatin: Design, characterization and evaluation of their potential use in bone tissue engineering," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 7, pp. 1–20, 2020.
- [132] K. Mariia, M. Arif, J. Shi, F. Song, Z. Chi, and C. Liu, "Novel chitosan-ulvan hydrogel reinforcement by cellulose nanocrystals with epidermal growth factor for enhanced wound healing: In vitro and in vivo analysis," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 183, pp. 435–446, 2021.
- [133] B. B. Sedayu, M. J. Cran, and S. W. Bigger, "Characterization of Semi-refined Carrageenan-Based Film for Primary Food Packaging Purposes," *J. Polym. Environ.*, vol. 26, no. 9, pp. 3754–3761, 2018.
- [134] J. J. G. Van Soest, R. C. Bezemer, D. De Wit, and J. F. G. Vliegenthart, "Influence of glycerol on the melting of potato starch," *Ind. Crops Prod.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, 1996.
- [135] M. Rezaei and A. Motamedzadegan, "The Effect of Plasticizers on Mechanical Properties and Water Vapor Permeability of Gelatin-Based Edible Films Containing Clay Nanoparticles," *World J. Nano Sci. Eng.*, vol. 05, no. 04, pp. 178–193, 2015.
- [136] A. Ramu Ganesan, M. Shanmugam, and R. Bhat, "Producing novel edible films from semi refined carrageenan (SRC) and ulvan polysaccharides for potential food applications," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 112, pp. 1164–1170, 2018.
- [137] T. H. McHugh and J. M. Krochta, "Sorbitol-vs Glycerol-Plasticized Whey Protein Edible Films: Integrated Oxygen Permeability and Tensile Property Evaluation," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 42, no. 4, pp. 841–845, 1994.
- [138] A. Farhan and N. M. Hani, "Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol," *Food Hydrocoll.*, vol. 64, pp. 48–58, 2017.