

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
BIONANOCOMPUESTOS A PARTIR DE NOSTOC COMMUNE**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

William Gianfranco Cornejo Tafur

ASESOR:

Fernando Gilberto Torres García

Lima, Octubre, 2024

Informe de Similitud


Yo, Fernando Gilberto Torres García,
docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia
Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado
Fabricación y Caracterización de Bionanocompuestos a partir de Nostoc Commune,
del autor

William Gianfranco Cornejo Tafur,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 03/12/2024.
- 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: San Miguel, 03 de diciembre del 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Fernando Gilberto Torres García	
DNI: 07879100	
ORCID: 0000-0002-3123-266X	

RESUMEN

El constante uso de polímeros comerciales derivados de petróleo en la industria ha traído a discusión problemas que estos pueden generar en el medio ambiente como su tardía degradación. A raíz de esto, los bioplásticos hechos de biopolímeros y materiales naturales han surgido como una alternativa al uso de plásticos comerciales. Por esta razón, en la presente tesis se desarrolla la fabricación y caracterización de un nuevo bionanocompuesto hecho a partir de *Nostoc commune*, una cianobacteria común que crece en la sierra andina de Perú, y nanorefuerzos de montmorillonita (MMT), una nanoarcilla.

A través de un método de extracción sistemático se obtuvo los exopolisacáridos de *N. commune* con una eficiencia similar a otros métodos de extracción revisados en la literatura. Posteriormente, diferentes cantidades de MMT (0, 1, 2, 5 y 7 wt%) se agregaron para la fabricación de films del bionanocompuesto de *N. commune* con MMT. Las caracterizaciones fisicoquímicas mediante FTIR permitió conocer la presencia de grupos hidroxilos, polifenoles, carboxilos, hidrocarburos y unidades de glucosa típicos de los exopolisacáridos. Además, se identificó un aumento de grupos OH al aumentar las cantidades de MMT. Las caracterizaciones térmicas de TGA demostraron que existe una mejor estabilidad térmica para los films de NC/MMT 5% y 7% cuando la pérdida de peso es de 50% al tener temperaturas de degradación de hasta 90°C más respecto al film base. Por otra parte, el DSC realizado mostró que los picos endotérmicos asociados a la pérdida de humedad no son afectados por la presencia de MMT. La caracterización morfológica demostró que agregar MMT al biopolímero hace que pierda su uniformidad debido al aumento de rugosidad en su superficie. Las caracterizaciones mecánicas demostraron que los films con MMT presentaron mejores propiedades mecánicas, siendo los films de NC/MMT 5 wt% los que tuvieron los valores más altos de módulo elástico y resistencia (20.02 MPa y 2.24 MPa, respectivamente). Es decir, un aumento de 20.02% y 50.33% de estas propiedades respecto al film base.

Los resultados encontrados en el presente trabajo sugieren que estos nuevos bionanocompuestos a partir de *N. commune* puede servir como un material prometedor con potenciales aplicaciones biomédicas como recubrimientos o membranas.

ABSTRACT

The frequent use of commercial petroleum-derived polymers in the industry has brought up discussions about the problems they can generate in the environment, such as their slow degradation rate. As a result, bioplastics made from biopolymers and natural materials have emerged as an alternative to the use of commercial plastics. Therefore, the present thesis focuses on the manufacturing and characterization of a new bionanocomposite made from *Nostoc commune*, a common cyanobacteria present in the Andean mountains of Peru, and montmorillonite nanoreinforcements, a type of nanoclay.

Through a systematic extraction method, exopolysaccharides from *N. commune* were extracted with similar efficiency compared to other similar extraction methods in the literature. Subsequently, different amounts of montmorillonite nanoparticles were added to prepare *N.commune* based bionanocomposite films (0, 1, 2, 5 y 7 wt%). The physicochemical characterizations via FTIR revealed the presence of hydroxyl, polyphenol, carboxyl, hydrocarbon groups, and typical glucose units found in exopolysaccharides. Additionally, an increase in OH groups was identified as the amount of montmorillonite increased. TGA characterizations demonstrated an improved thermal stability for the NC/MMT 5% and 7% films, as the 50% weight loss occurred at degradation temperatures up to 90°C higher compared to the base film. Moreover, the DSC analysis showed that the endothermic peaks associated with moisture loss were not affected by the presence of montmorillonite. Morphological characterization revealed that the addition of montmorillonite to the biopolymer reduced its uniformity due to increased surface roughness. Mechanical characterizations showed that films containing montmorillonite exhibited enhanced mechanical properties, with the NC/MMT 5 wt% films achieving the highest elastic modulus and tensile strength values (20.02 MPa and 2.24 MPa, respectively), representing increases of 20.02% and 50.33% over the base film.

The results obtained in this study suggest that this film based on a novel bionanocomposite derived from *N. commune* could serve as a promising material with potential biomedical applications such as coatings or membranes.

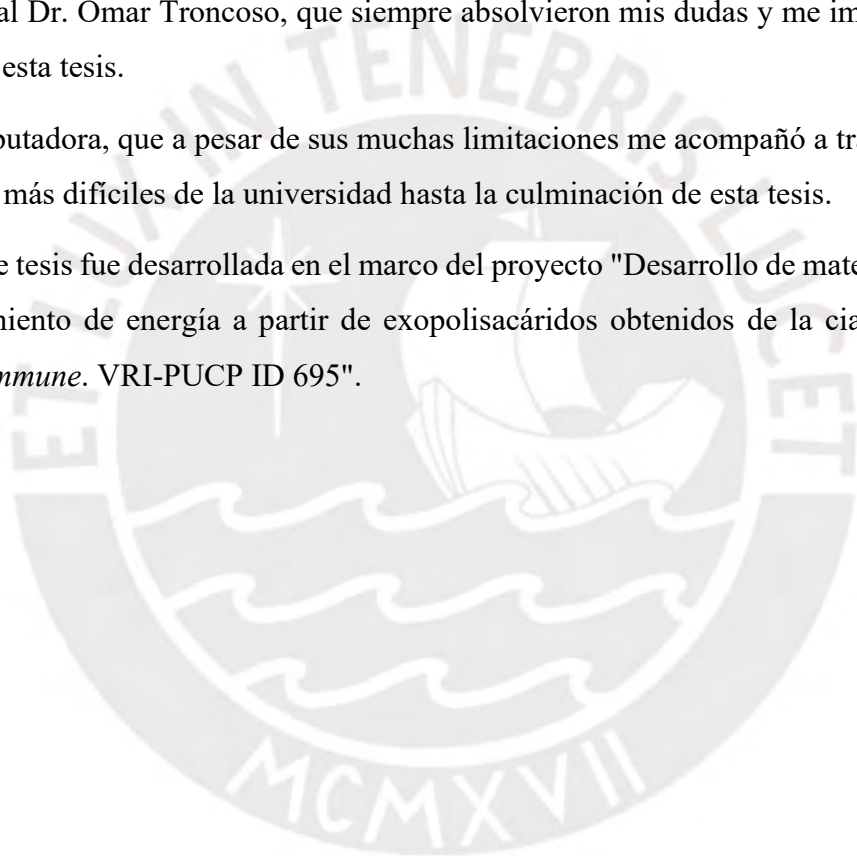
AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanas, en especial a mi madre, por haberme apoyado durante toda mi carrera siendo el principal motivo por el que decidí embarcarme en mi vida universitaria y sin ella no sería posible que a día de hoy no solo haya realizado esta tesis, sino también ser la persona que soy.

A mi asesor, el Dr. Fernando Torres, por la oportunidad, su paciencia y su tiempo. Al Grupo de Investigación en Polímeros y Materiales Compuestos (POLYCOM), en especial a Karen y al Dr. Omar Troncoso, que siempre resolvieron mis dudas y me impulsaron a seguir con esta tesis.

A mi computadora, que a pesar de sus muchas limitaciones me acompañó a través de los momentos más difíciles de la universidad hasta la culminación de esta tesis.

La presente tesis fue desarrollada en el marco del proyecto "Desarrollo de materiales para almacenamiento de energía a partir de exopolisacáridos obtenidos de la cianobacteria *Nostoc commune*. VRI-PUCP ID 695".



CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS	ix
INTRODUCCIÓN	x
OBJETIVOS	xii
Objetivo General.....	xii
Objetivos Específicos	xii
CAPITULO 1 ESTADO DEL ARTE	1
1.1 Polímeros.....	1
1.2 Biopolímeros	2
1.3 Exopolisacáridos	4
1.4 <i>Nostoc Commune</i>	6
1.5 Materiales Compuestos	8
1.6 Nanomateriales.....	10
1.7 Nanocompuestos Poliméricos	11
1.8 Tipos de Nanocompuestos	14
1.9 Montmorillonita	15
1.10 Nanocompuestos Poliméricos Comerciales	18
1.11 Bionanocompuestos Poliméricos.....	22
1.12 Bionanocompuestos Poliméricos Elaborados en Perú	22
CAPITULO 2 MÉTODO EXPERIMENTAL	27
2.1 Materiales.....	27

2.1.1	Nostoc Commune	27
2.1.2	Nanorefuerzos	28
2.2	Proceso de Obtención de Exopolisacáridos	29
2.2.1	Tratamiento y Limpieza	29
2.2.2	Extracción de <i>Nostoc Commune</i>	29
2.3	Preparación de Bionanocompuestos	33
2.3.1	<i>Nostoc Commune</i> y Glicerol	34
2.3.2	<i>Nostoc Commune</i> y Montmorillonita	36
2.4	Ensayos de Caracterización	40
2.4.1	Dispersión de Luz Dinámica (DLS)	40
2.4.2	Caracterizaciones Estructurales: FTIR – ATR	41
2.4.3	Caracterizaciones Térmicas	42
2.4.4	Caracterización Morfológica	44
2.4.5	Caracterizaciones Mecánicas	45
CAPITULO 3	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
3.1	Extracción de <i>Nostoc Commune</i>	46
3.2	Dispersión de Luz Dinámica – DLS	47
3.3	Caracterización Estructural: FTIR – ATR	49
3.4	Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC)	51
3.5	Análisis Termogravimétrico (TGA)	53
3.6	Caracterización morfológica: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	57
3.7	Caracterizaciones Mecánicas	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de las cadenas de polímeros: lineales, ramificados y entrecruzados.	2
Figura 2. Clasificación de biopolímeros según su origen.	3
Figura 3. Quitosano en forma de pellets.	5
Figura 4. Método de extracción de EPS de colonias de <i>Weisella confusa</i>	6
Figura 5. Imagen Representativa de Nostoc Commune.	7
Figura 6. Tipo de Materiales Compuestos.	9
Figura 7. Geometría y ejemplos de nanopartículas comunes y su respectiva relación área superficial/volumen.	11
Figura 8. Imagen representativa de los componentes de un nanocompuesto polimérico.	12
Figura 9. Rutas de penetración de los gases y resultados de las propiedades de barrera contra los gases de los nanocompuestos de óxido de grafeno y poliestireno comparado al poliestireno puro.	13
Figura 10. Tipos de nanocompuestos.	14
Figura 11. Esquema representativo de la estructura de la estructura de la montomorillonita.	15
Figura 12. Módulo de Young para distintas concentraciones de MMT en los bionanocompuestos PLA/MMT.	17
Figura 13. Timing belt cover hecho de a base de nylon 6 y nanoarcilla híbrida.	19
Figura 14. Uso del Nylon 6 en automóviles.	20
Figura 15. Proceso de elaboración de los films de almidón de papa y nanocristales de celulosa.	23
Figura 16. Figura representativa del método de preparación de bionanocompuestos de celulosa bacteriana a través del método de hidracina.	25
Figura 17. Imagen representativa del cushuro (N. Commune) siendo comercializado en el mercado de Magdalena (Lima, Perú).	28
Figura 18. Montmorillonita. Presentación de 500 g (Sigma Aldrich, USA).	28
Figura 19. Imagen representativa del circuito de reflujo.	30

Figura 20. Vista del precipitado del exopolisacárido formado.....	31
Figura 21. Trituración del exopolisacárido.....	32
Figura 22. Diagrama de procesos para la obtención de exopolisacáridos.....	33
Figura 23. Disolución de 1g de exopolisacárido de <i>N. commune</i> en 100 mL de agua destilada a 350 rpm y 80°C en un agitador magnético.....	35
Figura 24. a) NC/Gli en un petri antes del secado. b) Obtención del film de NC/Gli luego del secado.....	36
Figura 25. Film del nanocompuesto NC/MMT 1%.....	38
Figura 26. Film del nanocompuesto NC/MMT 2%.....	38
Figura 27. Film del nanocompuesto NC/MMT 5%.....	39
Figura 28. Film del nanocompuesto NC/MMT 7%.....	39
Figura 29. DLS Malvern Zeta Sizer.....	41
Figura 30. Espectrómetro FTIR Perkin Palmer modelo Spectrum Two con accesorio ATR.....	42
Figura 31. Equipo Perkin-Elmer TGA 4000.....	43
Figura 32. Equipo Perkin-Elmer DSC 4000.....	43
Figura 33. SEM Horiba Quanta 650.....	44
Figura 34. Máquina de ensayos a tracción Mark-10.....	45
Figura 35. Resultados de DLS de la montmorillonita.....	48
Figura 36. Figura representativa del espectro FTIR de los films de NC/Glicerol, NC/MMT 1, 2, 5 y 7%.....	51
Figura 37. Curvas DSC de los films de NC/Gli y NC/MMT al 1%, 2%, 5% y 7%.....	53
Figura 38. Termograma representativo TGA del film de NC/Gli.....	55
Figura 39. Termograma representativo TGA del film NC/MMT 1%.....	55
Figura 40. Termograma representativo del film NC/MMT 2%.....	56
Figura 41. Termograma representativo del film NC/MMT 5%.....	56
Figura 42. Termograma representativo del film NC/MMT 7%.....	57
Figura 43. Imagen SEM del film NC/Gli.....	58
Figura 44. Imágenes SEM de los bionanocompuestos NC/MMT con cantidades de MMT de (a) 1% (b) 2% (c) 5% y (d) 7%.....	58
Figura 45. Muestra de NC/MMT sometida a tracción.....	59
Figura 46. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/Gli.....	66

Figura 47. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 1%..... 66

Figura 48. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 2%..... 67

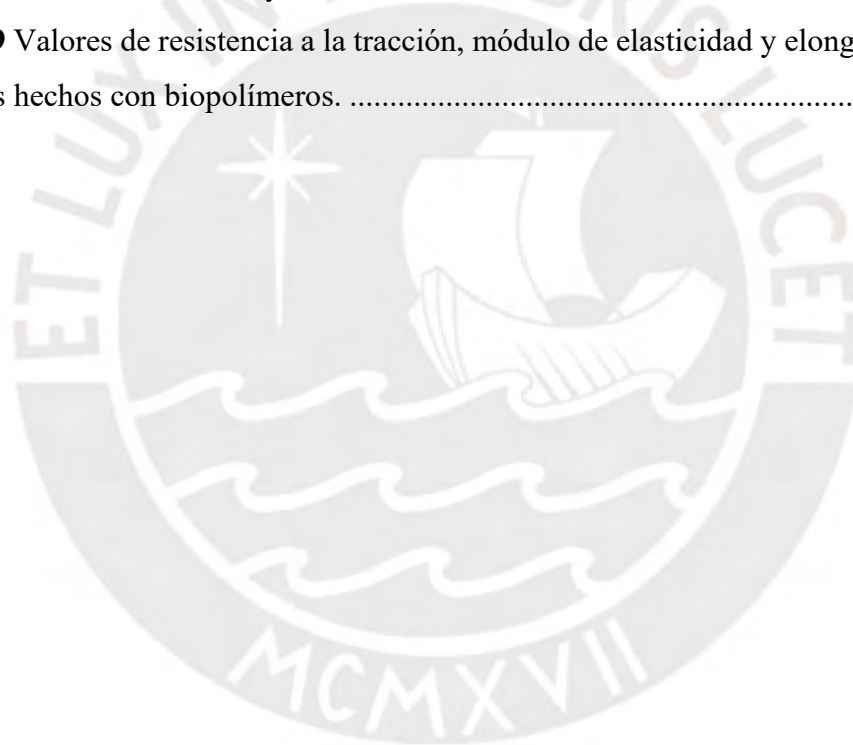
Figura 49. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 5%..... 67

Figura 50. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 7%..... 68



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ejemplos de nanocompuestos poliméricos comerciales.....	21
Tabla 2 Bionanocompuestos elaborados en Perú.....	25
Tabla 3 Cantidades de componentes del NC/Glicerol.	34
Tabla 4 Cantidades de componentes del nanocompuesto NC/MMT.....	37
Tabla 5 Rendimiento de la extracción de Nostoc Commune.....	47
Tabla 6 Resultados de ensayos de DLS de montmorillonita.	48
Tabla 7 Espesor promedio de film NC/glicerol	61
Tabla 8 Resultados de ensayos a tracción de los films.	62
Tabla 9 Valores de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y elongación máxima de films hechos con biopolímeros.	65



INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los plásticos convencionales derivados de fuentes fósiles han sido utilizados en amplia variedad de industrias y aplicaciones. Esto debido a sus buenas propiedades mecánicas, de barrera, aislantes térmicos, resistencia a la corrosión, etc. Sin embargo, su uso ha generado también repercusiones debido al impacto ambiental generado desde el momento de su manufactura hasta su posterior desecho. La reducción de recursos fósiles no renovables y la degradación tardía de estos han hecho que se desarrollen nuevas alternativas de carácter más eco-amigable y que puedan satisfacer las mismas necesidades de manera eficiente.

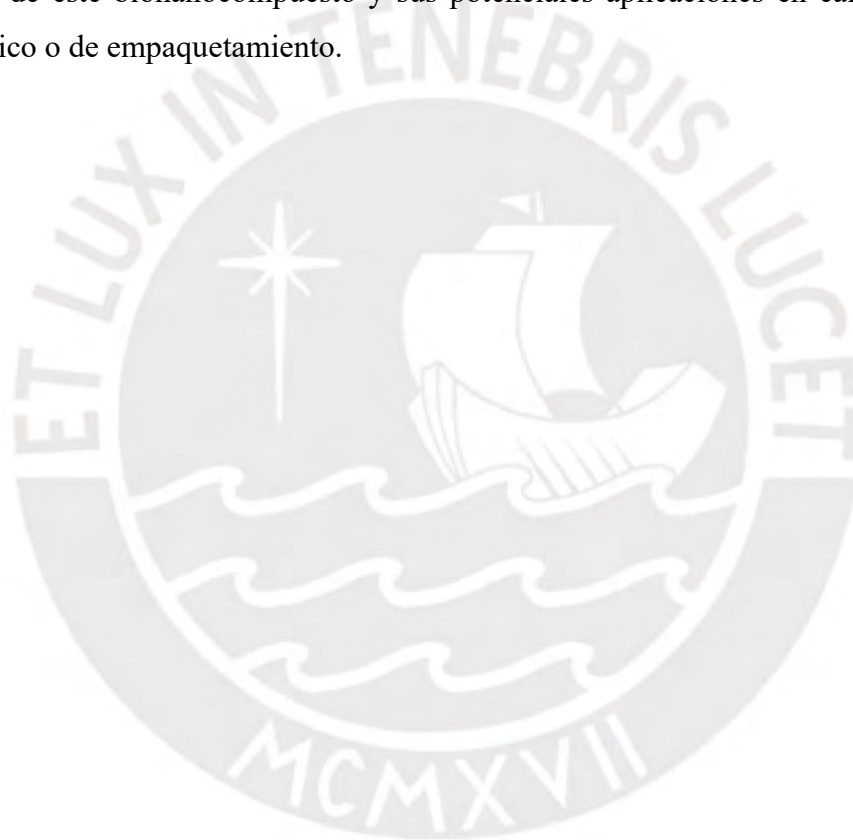
Ante esta problemática, los biopolímeros; de características biodegradables, no tóxicas, sostenibles y provenientes de fuentes renovables, son una solución novedosa para reemplazar los plásticos convencionales. Además, presentan buenas propiedades contra gases como el oxígeno, son biocompatibles y se encuentran en abundancia. A pesar de sus beneficios, estas presentan también algunas limitaciones como bajas propiedades mecánicas y bajas propiedades de barrera al agua por sus características hidrofílicas.

Para superar estas limitaciones se ha hecho uso de la nanotecnología a través del uso de diversos tipos de nanorefuerzos. Ejemplos de estos son los nanotubos de carbono, montmorillonita, nanocelulosa, nanopartículas de titanio, entre otros. Al interactuar con la matriz biopolimérica de manera física o química, las propiedades del material nanoreforzado mejoran notablemente. A este tipo de materiales se les denomina bionanocompuestos.

Esta tesis se centra en la fabricación de un nuevo bionanocompuesto utilizando como matriz biopolimérica *Nostoc commune*, una cianobacteria de abundante presencia en los lagos de las zonas andinas del Perú; y nanorefuerzos de MMT, una nanoarcilla con buenas propiedades mecánicas, bajo costo y ampliamente disponible comercialmente. Se investigará sus propiedades mecánicas, térmicas, fisicoquímicas y morfológicas a través de las técnicas de caracterización como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR), dispersión de luz dinámica (DLS), calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA), microscopía electrónica de barrido (SEM) y ensayos de tracción. Se evaluará y discutirá estos resultados con distintas

cantidades de MMT, para posteriormente compararlo con films de *N. commune* con glicerol y bionanocompuestos similares disponibles en la literatura.

El objetivo final de esta tesis es desarrollar un nuevo bionanocompuesto de *N. commune* y montmorillonita. Ante la escasa información disponible de bionanocompuestos elaborados a partir de esta cianobacteria, esta investigación pretende dar un paso adelante a través del conocimiento de sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y térmicas. Los resultados obtenidos ayudarán a clarificar la posibilidad de la fabricación de bioplásticos a partir de este bionanocompuesto y sus potenciales aplicaciones en campos como el biomédico o de empaquetamiento.



OBJETIVOS

Objetivo General

Fabricar bionanocompuestos a partir de exopolisacáridos de la cianobacteria *Nostoc commune* y nanorefuerzos de montmorillonita.

Objetivos Específicos

- Describir el proceso de manufactura de los bionanocompuestos a partir de *Nostoc commune*.
- Caracterizar las propiedades mecánicas, térmicas, fisicoquímicas y morfológicas de los bionanocompuestos empleando técnicas de caracterización que incluyen la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR), dispersión de luz dinámica (DLS), calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA), ensayos de tracción y microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Analizar los resultados obtenidos de las técnicas de caracterización mencionados para los bionanocompuestos con distintos porcentajes de nanorefuerzos.
- Comparar los resultados obtenidos de las caracterizaciones de los bionanocompuestos con otros reportados en la literatura.

CAPITULO 1 ESTADO DEL ARTE

1.1 Polímeros

Los polímeros son materiales compuestos por una gran cantidad de unidades repetitivas llamadas monómeros. Estas forman largas cadenas, principalmente formadas por carbono e hidrógeno. Dentro de estas cadenas puede haber cientos, miles o millones de monómeros, formando cadenas de moléculas de alto peso molecular, comúnmente denominadas macromoléculas. De acuerdo a la forma de estas cadenas se pueden clasificar en polímeros lineales, ramificados y entrecruzados (Figura 1). El entrecruzado que existe en estas cadenas define la diferenciación entre un polímero termoplástico y termoestable, pues estas determinan el comportamiento térmico del material. Los polímeros que no presentan entrecruzamiento (lineales y ramificados) pasan a fase líquida antes de llegar a su temperatura de descomposición. Estos polímeros son definidos como termoplásticos. Por otra parte, los polímeros que poseen entrecruzamientos se descomponen antes de llegar a poder derretirse como líquido, denominándose este tipo de polímeros como termoestables o termofijos (Padsalgikar, 2017).

Son piezas fundamentales en diversos productos de la industria debido a sus principales propiedades que presentan los polímeros como bajo peso molecular, aislante eléctrico y térmico, son durables, moldeables, presentan resistencia a la corrosión, son de bajo costo, entre otros (A. Kumar & Gupta, 2003).

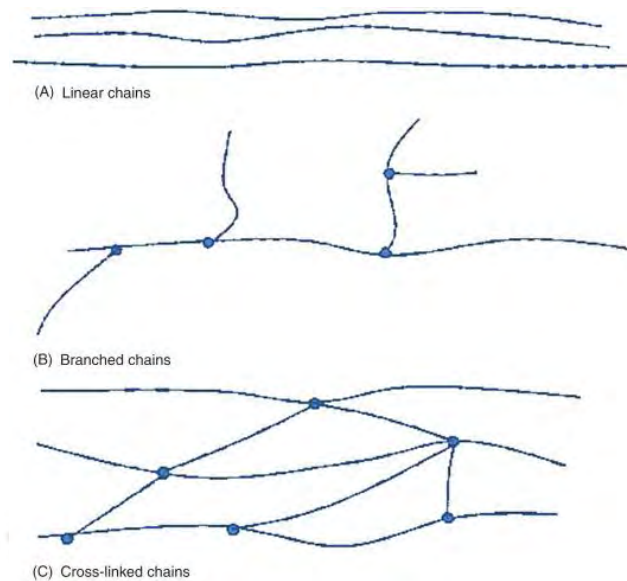


Figura 1. Estructura de las cadenas de polímeros: lineales, ramificados y entrecruzados.

Fuente: Padsalgikar (2017).

1.2 Biopolímeros

Los biopolímeros o polímeros naturales son macromoléculas que están presentes en los sistemas biológicos de los seres vivos como plantas, microorganismos, animales. Existen diversos biopolímeros, por ejemplo, la celulosa, es el biopolímero más abundante en la Tierra con una producción anual de 1.5×10^{12} toneladas. Está presente en las paredes celulares de plantas y árboles. También existen ciertos tipos de bacterias y algas capaces de bio-sintetizar celulosa. El segundo biopolímero más abundante es la quitina, presente en el exoesqueleto de artrópodos, por ejemplo, en el caparazón de crustáceos como camarones y cangrejos, además de las cutículas de insectos. El quitosano, presente en el esqueleto de crustáceos marinos, posee una estructura similar a la quitina, con la diferencia que la quitina es insoluble en solventes comunes, mientras que el quitosano puede ser disuelto en soluciones ácidas con un pH menor a 6.5 (S. Dassanayake et al., 2019).

De acuerdo a su origen los biopolímeros se pueden clasificar en tres diferentes categorías: biopolímeros naturales, biopolímeros sintéticos y biopolímeros basados en sus unidades repetitivas (Singh et al., 2021). En la Figura 2 se realizó un esquema de esta clasificación con ejemplos de cada uno.

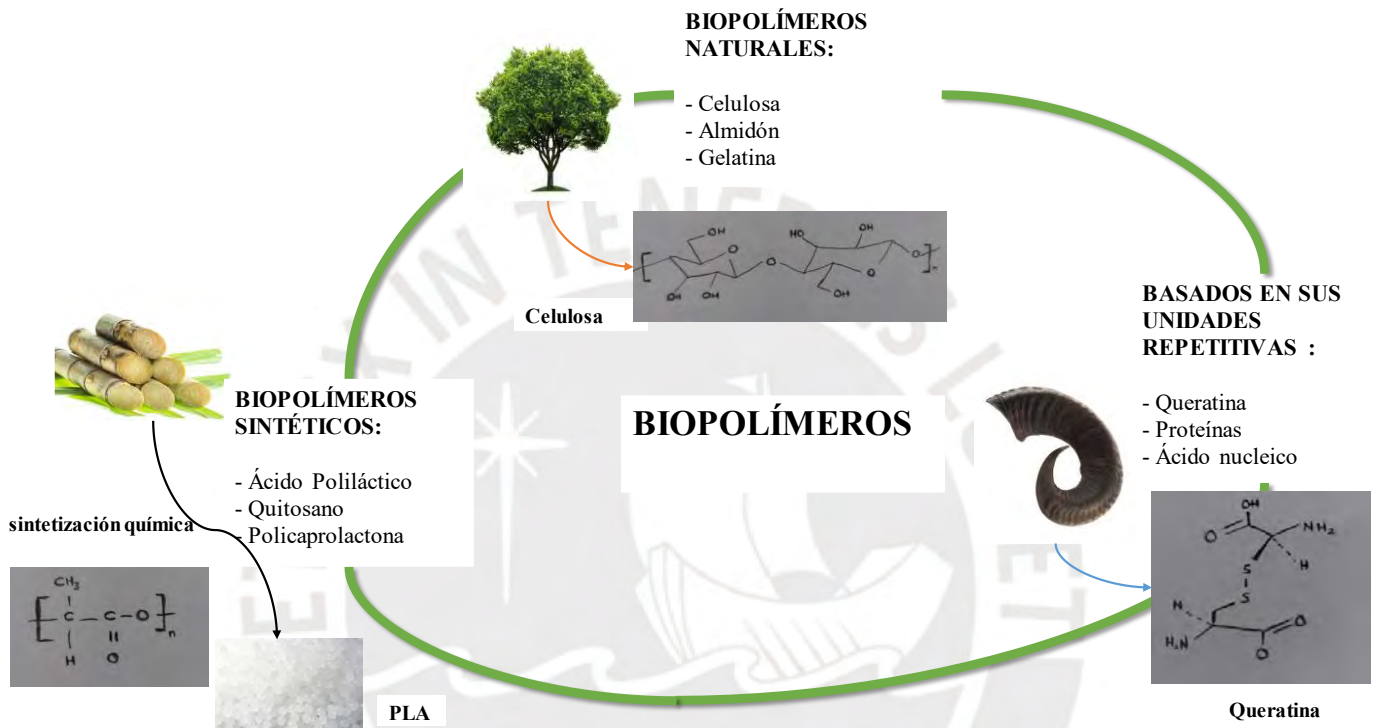


Figura 2. Clasificación de biopolímeros según su origen.

Los biopolímeros presentan diversas características las cuales permiten que tengan diversos campos de aplicaciones: son versátiles; presentan varias propiedades físicas, mecánicas, térmicas, etc.; son biodegradables, renovables, no tóxicos y biocompatibles. Entre sus aplicaciones podemos encontrar, por ejemplo, el quitosano ha sido utilizado en la industria biomédica debido a sus propiedades biocompatibles y biodegradables en forma de geles, membranas, films. El uso de este biopolímero se ha podido ampliar en aplicaciones como la ingeniería de tejidos cuando se ha combinado con otros materiales para así mejorar sus propiedades mecánicas (Sharifianjazi et al., 2022). Otra aplicación es en la industria alimentaria, donde un biopolímero muy utilizado es la carragenina como agente espesante y gel en diversos alimentos (Udo et al., 2023). En la industria de

empaques, el PLA, polihidroxialcanoato (PHA) y el almidón han sido biopolímeros muy utilizados por ser biodegradables y también comercialmente accesibles. Sin embargo, las características hidrofílicas que poseen han hecho que su uso se vea limitado ante la posible filtración de elementos indeseados o efectos en el contenido de los empaques. Una alternativa con buenas propiedades de barrera es el ácido poliglicólico (PGA), un biopolímero utilizado para mejorar las propiedades de barrera del almidón y el PLA (Guessasma, 2022).

Debido a la abundante biodiversidad existente en el país, se puede encontrar una vasta cantidad de biopolímeros. Se ha reportado en la literatura la elaboración de films biodegradables a partir del almidón de diversos cultivos andinos como papa, yuca, garbanzos, camote, entre otros (Torres et al., 2011). La cianobacteria *Nostoc commune* es también un ejemplo de biopolímero que existe en la zona de la sierra peruana, y presenta no solo un valor nutricional, sino un potencial para elaborar materiales como bioplásticos a partir de ella.

1.3 Exopolisacáridos

Los exopolisacáridos (EPS) son polímeros compuestos de unidades repetitivas de azúcar o derivados de ella. Son producidas por organismos como las algas, bacterias, hongos. De acuerdo a sus unidades de monosacáridos, los EPS se pueden clasificar en homopolisacáridos y heteropolisacáridos (P. Paul et al., 2023). Los homopolisacáridos son aquellos que consisten solo de un solo tipo de monosacárido (dextrano, pululano, celulosa, curdlan, levan). Por otra parte, los heteropolisacáridos son estructuras más complejas compuestas de unidades repetitivas de dos o más tipos de monosacáridos (xantano, gellan, alginato). La composición de los EPS usualmente consiste de pentosas, hexosas, ácidos urónicos, amino azúcares, proteínas, ácidos nucleicos, sustituyentes orgánicos como el acetato, piruvato, glicerato, succinato y sustituyentes inorgánicos como el sulfato y fosfato (Parikh & Madamwar, 2006; Mishra & Jha, 2013).

El uso de los EPS se ha reportado en diversas aplicaciones. En la industria alimentaria, por ejemplo, el curdlan, gellan y dextrano han sido utilizados como gelificantes (Xu et al., 2017; Suresh Kumar et al., 2007), mejorar la viscosidad de productos alimenticios

derivados de leche (Mangolim et al., 2017) y optimizar la textura de fideos hechos con tofu (Xin et al., 2018). Por otro lado, el quitosano (Figura 3) ha sido utilizado en aplicaciones biomédicas como el tratamiento de infecciones bacterianas (Meng et al., 2021) y la ingeniería de tejidos (Nakamatsu et al., 2006).

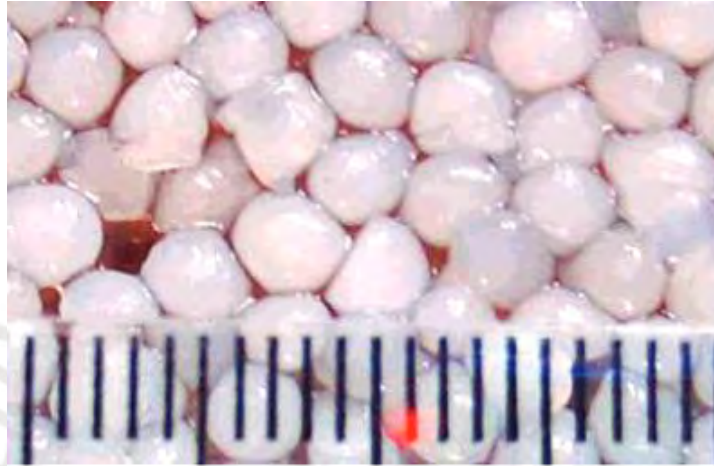


Figura 3. Quitosano en forma de pellets.

Fuente: Nakamatsu et al. (2006).

La extracción de EPS puede ser a través de métodos físicos o químicos. Los métodos físicos son sonicación, calentamiento, centrifugación, *freeze thawing*; mientras los métodos químicos se utilizan reactivos como NaOH, formaldehído o etanol para realizar la extracción. La *Figura 4* muestra el método utilizado por Kavitate et al. (2022) para extraer EPS de galactano a partir de colonias de *Weisella confusa*.

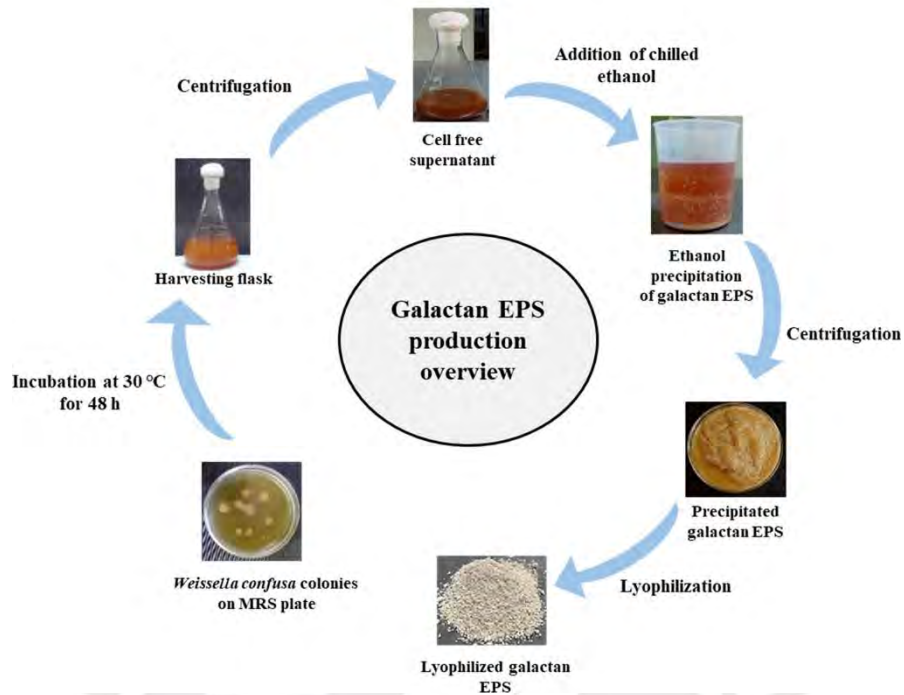


Figura 4. Método de extracción de EPS de colonias de *Weissella confusa*.

Fuente: Kavitate et al. (2022)

1.4 *Nostoc Commune*

Las cianobacterias son microorganismos que pueden producir fotosíntesis ya que contienen clorofila. Su principal diferencia con las bacterias es que no poseen un núcleo. Tienen una alta capacidad de adaptación, pudiéndose adaptar a distintos cambios climáticos. Ciertas cianobacterias pueden producir polihidroxicarboxilatos (PHA) de los cuales hay derivados como el polihidroxibutirato (PHB) que ha mostrado ser una potencial fuente para la elaboración de biopolímeros en reemplazo a polímeros tradicionales utilizados como el polipropileno (Markl et al., 2019). Diversos autores han investigado las concentraciones de acumulación de PHA o PHB que pueden encontrarse en cianobacterias, encontrándose, en general, que la mayoría de investigaciones están aún en una temprana etapa de desarrollo, siendo los biopolímeros extraídos de estas no comercialmente disponibles en el momento que se escribe la presente tesis. *Aulosira*

fertilissima es la primera cianobacteria encontrada capaz de acumular concentraciones de PHB de hasta 85%, mostrando que el biopolímero extraído de ella compartía propiedades similares a la de polímeros comerciales (Markl et al., 2019).

Las cianobacterias de *N. commune* pertenecen al género *Nostoc*. Dicho género comprende también las especies *N. sphaericum*, *N. paludosum*, *N. carneum*, entre otras. Se las suele confundir con algas a pesar de no serlas propiamente, ya que están compuestas de células procariotas y generar su propio alimento mediante la fotosíntesis oxigénica en el agua. Su aspecto es verdoso, de forma esférica y de suave textura como se observa en la Figura 5. Suelen encontrarse en zonas húmedas, como ríos y lagunas, hasta en invernaderos y vegetaciones en lugares húmedos. Son muy comunes y aparecen en diversos hábitats y países. Se pueden hallar en países como Tailandia, China, Bolivia y Perú. Son considerados comestibles y de alto valor nutricional, siendo parte de la cultura gastronómica de algunos países donde esta cianobacteria crece (Z. Huang et al., 1998). En el Perú a esta cianobacteria se le denomina comúnmente cushuro o murmunto. Debido a su composición abundante de componentes bioactivos, se ha registrado su uso en la industria médica y farmacéutica (Tseng: et al., 2021).



Figura 5. Imagen Representativa de *Nostoc Commune*.

La cantidad de EPS en *N. commune* puede llegar a constituir más del 60% de su peso seco (Hill et al., 1997). Los polisacáridos producidos por esta cianobacteria son complejos y está compuesto por varios azúcares, entre ellos la galactosa, glucosa, arabinosa, xilosa, ácido urónico y ácido glucurónico (Brüll et al., 2000; Helm et al., 2000; KAJIYAMA & KOBAYAS, 2003). La presencia de estos se puede justificar posiblemente a su función de proteger las células de diversos hábitats además de la formación de complejas esteras microbianas en una gran variedad de sustratos. A día de hoy, la síntesis de los EPS en *N. commune* sigue siendo compleja de entender debido a la escasa información presente en la literatura (Pereira et al., 2013).

Diversos estudios han utilizado los EPS de *N. commune* en potenciales aplicaciones biomédicas debido a su actividad antibacterial y antioxidante (Quan et al., 2015; Li et al., 2011; H.-B. Wang et al., 2014), actividad antidiabética (X. Wang et al., 2022) y su efecto ante desórdenes mentales como la esquizofrenia (Bahnamiri et al., 2024).

Se ha reportado también el uso de *N. Commune* en la fabricación de biopolímeros en la literatura. Por ejemplo, S. Rodriguez et al. (2017) produjo films a partir de exopolisacáridos de *N. Commune*. Estos films fueron mejorados con la presencia de glicerol, un plastificante que ayuda la procesabilidad de los films de NC. Los resultados muestran propiedades mecánicas similares a los de otros exopolisacáridos previamente. Los films muestran un potencial uso en aplicaciones biomédicas como membranas y recubrimientos.

1.5 Materiales Compuestos

Son materiales formados por dos o más fases (materiales), formando un nuevo material con características superiores a la de cada componente por separado

Sus componentes principales son:

- Matriz: Se define como matriz a la fase continua del material compuesto. Proporciona al conjunto dependiendo del tipo de material y sus condiciones de utilización propiedades como resistencia a la corrosión, resistencia mecánica en caliente, bajo peso molecular,

etc. Generalmente, para que se cumpla una transmisión óptima, la matriz debe operar dentro del rango elástico.

Sus funciones principales:

- Propiciar la unión solidaria de los elementos que forman parte del refuerzo, separándolas para evitar la transmisión de grietas a través del compuesto.
- Transmitir y direccionar las cargas entre los elementos de refuerzo.

- Refuerzo: Usualmente son las segundas fases de un material compuesto. Estas ayudan a mejorar las propiedades del material en conjunto. Son la parte más importante del material compuesto ya que soportan el mayor porcentaje de los esfuerzos, y dependiendo de sus características, forma y orientación puede cambiar las propiedades mecánicas del material como resistencia y tenacidad.

Según la orientación y forma de sus fibras, estos se pueden clasificar principalmente en fibras continuas, fibras discontinuas, whiskers y partículas (Figura 6). Existen otras formas como la forma en trenzas desarrollado por la industria del textil (Zweben, 2015).

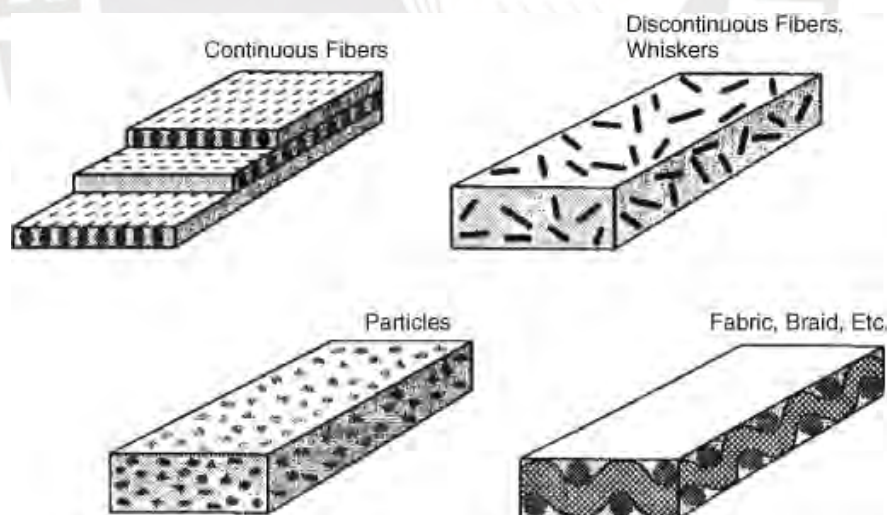


Figura 6. Tipo de Materiales Compuestos.

Fuente: Zweben (2015).

1.6 Nanomateriales

Los nanomateriales son materiales donde al menos una de sus dimensiones está en la escala nanométrica entre el rango de 1 a los 100 nm. Estos pueden ser provenientes de origen natural como minerales o también creados por el hombre, llamándose nanomateriales manufacturados (Handy et al., 2023). Usualmente tienen forma de partículas, capas o fibras y un área superficial muy grande que permite tener elevadas propiedades mecánicas, térmicas, químicas, eléctricas, entre otras, comparado a sus respectivas contrapartes de tamaño mayor (Kamel A. Abd-Elsalam, 2021). Esto ha atraído el interés y su aplicación en industrias como la alimentaria, espacial, química, cosmética y biomédica (Gupta, 2016).

Los nanorefuerzos son aquellos utilizados para mejorar las propiedades de otros materiales de una mayor escala. Estos tienen formas de nanotubos, nanopartículas, nanohilos, nanocapas, entre otros, y pueden clasificarse de acuerdo a su geometría en tres clases como materiales unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales de acuerdo a su escala (Schmidt et al., 2002). La Figura 7 muestra la clasificación mencionada y ejemplos de ellas.

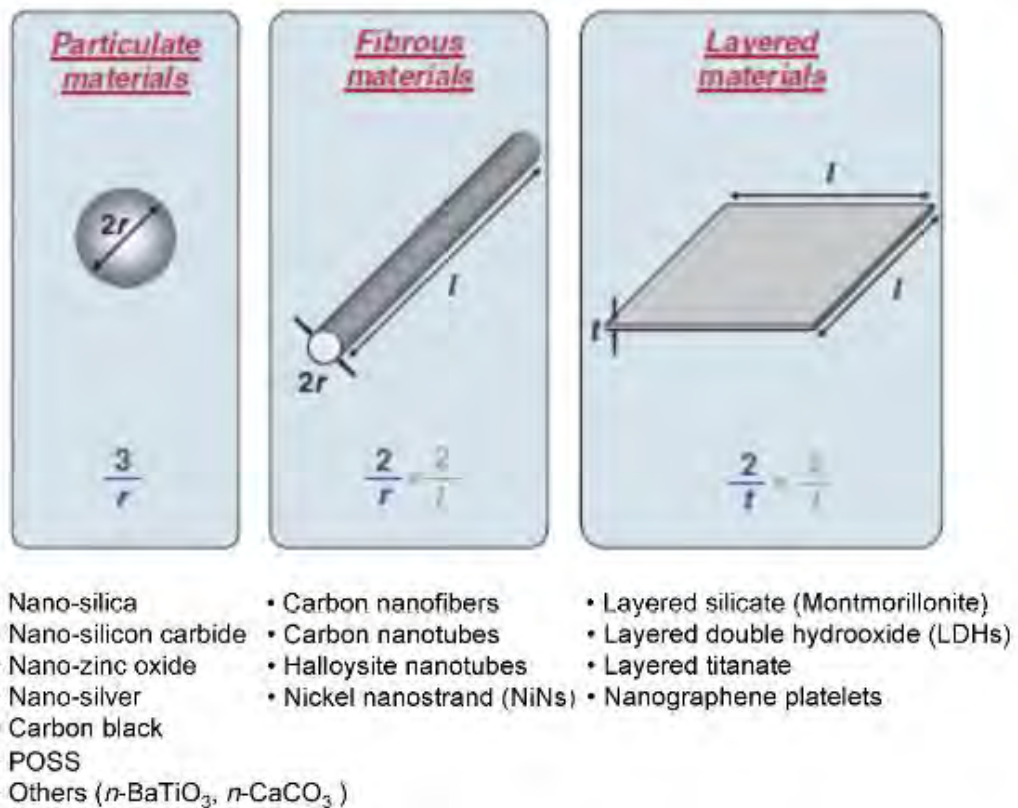


Figura 7. Geometría y ejemplos de nanopartículas comunes y su respectiva relación área superficial/volumen.

Fuente: Okamoto (2023).

1.7 Nanocompuestos Poliméricos

Los nanocompuestos poliméricos son una variante de los materiales compuestos. Son una combinación de dos o más fases, que contienen diversas composiciones y estructuras. Generalmente, el polímero es la fase continua (matriz) y los refuerzos de distintos materiales en una escala nanométrica (1-100 nm). A comparación de los refuerzos de materiales a microescala o macroscópicos estos presentan conductas distintas debido a su elevada relación longitud/diámetro y alta área específica. Las interacciones moleculares producto de estas características hacen que el material obtenga en conjunto mejores propiedades (Figura 8).

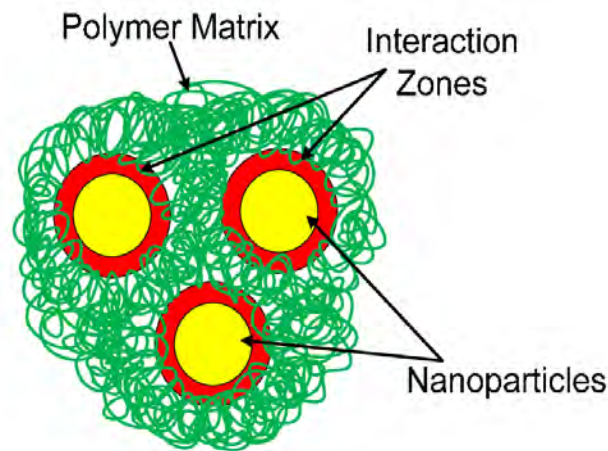


Figura 8. Imagen representativa de los componentes de un nanocompuesto polimérico.

Fuente: Ahmad et al. (2014).

Las propiedades que presentan los nanocompuestos son superiores en comparación a los macrocompuestos convencionales. Entre las más destacadas están la mejora en propiedades mecánicas (resistencia a la tensión, dureza, módulo de Young), térmicas (resistencia al calor, dilatación térmica, retardación de llama), eléctricas, resistencia química, permeabilidad a los gases, biodegradabilidad, entre otros (Okamoto, 2023) .

En la literatura se puede observar ejemplos de la mejora de propiedades. Por ejemplo, el laboratorio de investigación del ejército de los Estados Unidos mejoró la resistencia al impacto balístico con el uso de nanocompuestos hechos de policarbonato reforzado con nanoarcillas (Hussain et al., 2006). Szeluga et al. (2021) mejoraron las propiedades de resistencia a la flama con la inserción de grafito a una matriz epoxi, además de mejorar su descomposición térmica y la difusión de oxígeno debido a la formación de capas gruesas que forma el grafito. De manera similar, X. Huang & Brittain (2001) estudiaron el polimetilmetacrilato (PMMA) reforzado con nanoarcillas donde demostró una mejora en la temperatura de degradación (hasta 60° C más) y temperaturas de transición vítrea que llegan a ser 15°C más respecto a sus equivalentes macrocompuestos de PMMA.

La inserción de grafeno a una matriz de polidimetilsiloxano (PDMS) realizada por Berean et al. (2015) mejoró las propiedades de permeación ante gases. La adición de grafeno a un 0.25 wt% respecto al PDMS mostró la permeación más alta ante gases como CH₄, N₂, Ar a excepción del CO₂ donde la mejor permeación se dio cuando la cantidad de grafeno fue del 0.5 wt%. La mejora de otras propiedades interesantes, como la resistencia a la

corrosión, fue desarrollado por Yu et al. (2014) con la adición de óxido de grafeno a una matriz de poliestireno (PS). Estos nanocompuestos mejoraron propiedades contra la corrosión de manera superior comparadas a solo el PS, observándose que cuando la cantidad de óxido de grafeno es de 2 wt% se da un incremento en la eficiencia de protección de 37.90% a 99.53%. Otras propiedades también mejoraron respecto a la matriz polimérica de PS puro como la temperatura de descomposición térmica que incrementó de 298°C a 372°C, el módulo de almacenamiento aumentó de 1808.8 a 2802.4 MPa y las propiedades de barrera contra los gases como el oxígeno y nitrógeno (Figura 9). Timmerman et al. (2002) mejoraron las propiedades de dilatación térmica y redujeron las densidades de microfractura de ciclos criogénicos con la inserción de nanoarcillas a compuestos de fibra de carbono y epoxi.

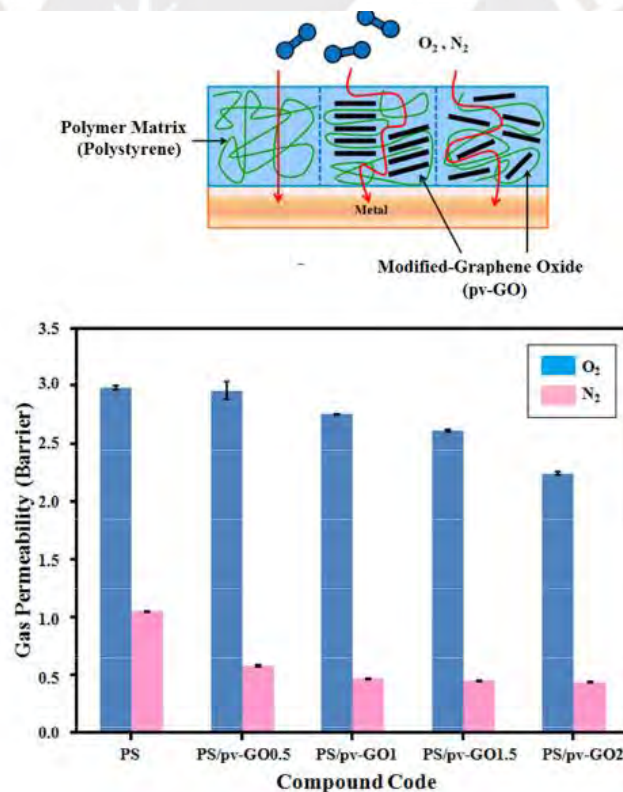


Figura 9. Rutas de penetración de los gases y resultados de las propiedades de barrera contra los gases de los nanocompuestos de óxido de grafeno y poliestireno comparado al poliestireno puro.

Fuente: Yu et al. (2014).

1.8 Tipos de Nanocompuestos

Existen tres tipos de nanocompuestos (Figura 10) de acuerdo a las fuerzas de interacción interfacial entre la matriz polimérica y los silicatos en forma de capas (Sinha Ray & Okamoto, 2003):

- a. Intercalados: La inserción de cadenas de polímeros se da entre las capas de silicato produciéndose estructuras intercaladas de una morfología multicapas alternando entre capas poliméricas e inorgánicas (J. Liu et al., 2006). Sus propiedades son parecidas a las de los materiales cerámicos.
- b. Floculados: Son, de manera conceptual, lo mismo que los nanocompuestos intercalados. Lo diferencia que las floculaciones son producidas en ocasiones por las interacciones borde-borde hidroxiladas de las capas de silicato.
- c. Exfoliados: En este tipo de nanocompuestos las capas individuales de la arcilla son separadas y dispersadas uniformemente en una matriz polimérica continua. La distancia entre capas aumenta considerablemente y esta depende del contenido de arcilla que es mucho menor a la de los nanocompuestos intercalados.



Figura 10. Tipos de nanocompuestos.

Fuente: Sinha Ray et al. (2003).

1.9 Montmorillonita

La montmorillonita o bentonita (MMT) es un mineral perteneciente al grupo de los silicatos. Es una roca de arcilla encontrada de manera natural en varias partes del mundo. Su estructura de partículas generalmente es en capas, donde cada una de estas contiene hojas estructuradas de forma octaédrica y tetraédrica (Figura 11). Estas hojas forman las capas que están unidas en cristalitas de arcilla por cationes entre cada capa mediante fuerzas de Van der Waals, fuerza electrostática o enlaces de hidrógeno (Uddin, 2018).

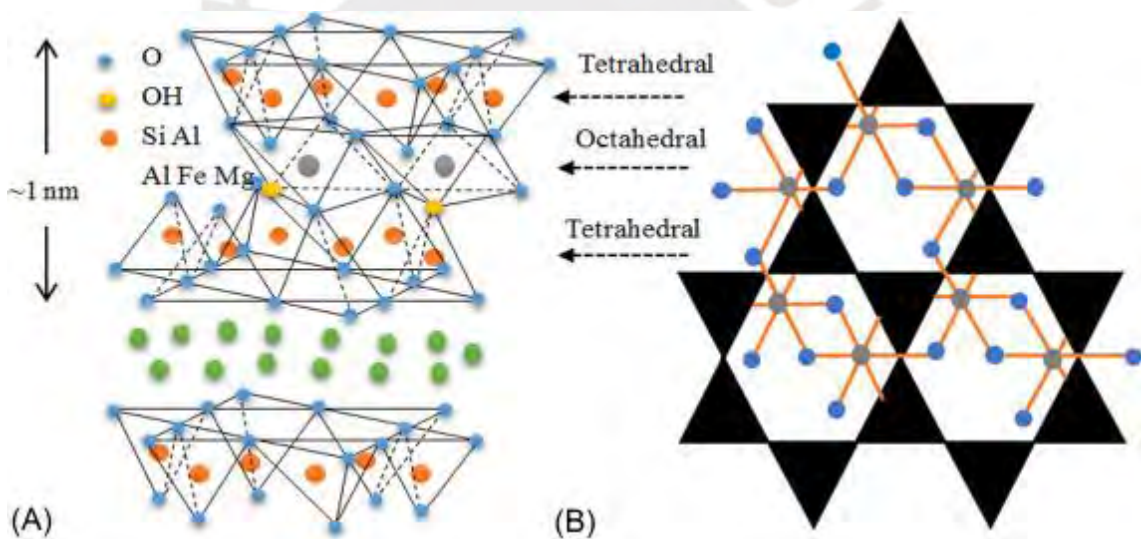


Figura 11. Esquema representativo de la estructura de la estructura de la montmorillonita.

Fuente: Zhou et al. (2019).

Las nanoarcillas producidas de MMT contienen alrededor de 98% de esta, y las interacciones entre las nanopartículas de MMT y una matriz de polímero dependen de la cantidad de grupos hidroxilos y cargas presentes en las nanopartículas.

Su diámetro (también referido como espesor) es de alrededor de 1 nm, mientras que sus dimensiones laterales están en el rango de 30 nm hasta ciertas décimas de micras e incluso más (Uddin, 2008; Sinha Ray & Okamoto, 2003). Estas dimensiones hacen que obtenga una relación de aspecto de alrededor de 200-500 con lo que se logra mejores propiedades mecánicas.

Los nanocompuestos con MMT y matriz polimérica han sido utilizados en los sectores de empaquetamiento y automotriz por la mejora de propiedades de distorsión de temperatura, estabilidad térmica, barrera contra gases, retardación al fuego y mecánicas (Bitinis et al., 2011). En los biopolímeros revisados en la literatura se ha encontrado su uso en la mejora de distintas propiedades. La resistencia máxima a la tracción de films hechos de bionanocompuestos a base de almidón, carboximetilcelulosa y MMT aumenta hasta tres veces su valor comparado a los films sin MMT cuando el contenido de esta es de un 7% en la investigación realizada por Ghanbarzadeh et al. (2013). Además, la permeabilidad al vapor de agua decreció con la adición del 7% de MMT a comparación de films hechos solo con almidón. Sin embargo, las características hidrofílicas del bionanocompuesto aumentaron con la adición del contenido de MMT.

Otro film realizado por Othman et al. (2019) a base de ácido poliláctico (PLA) en el cual se busca mejorar sus limitadas propiedades para su uso en el empaquetamiento en la industria alimentaria utiliza diferentes cantidades de MMT para mejorar sus propiedades. Los mejores resultados de propiedades mecánicas (módulo de Young y elongación máxima) y de barrera contra el oxígeno se obtuvieron cuando la cantidad de MMT en el bionanocompuesto era de 3 wt% (Figura 12). Cantidades mayores a 5 wt% empiezan a reducir significativamente estas propiedades debido a la aglomeración que se genera. También se observa que la adición de estas nanoarcillas tiene un bajo efecto sobre la transparencia en los films (menor al 10%).

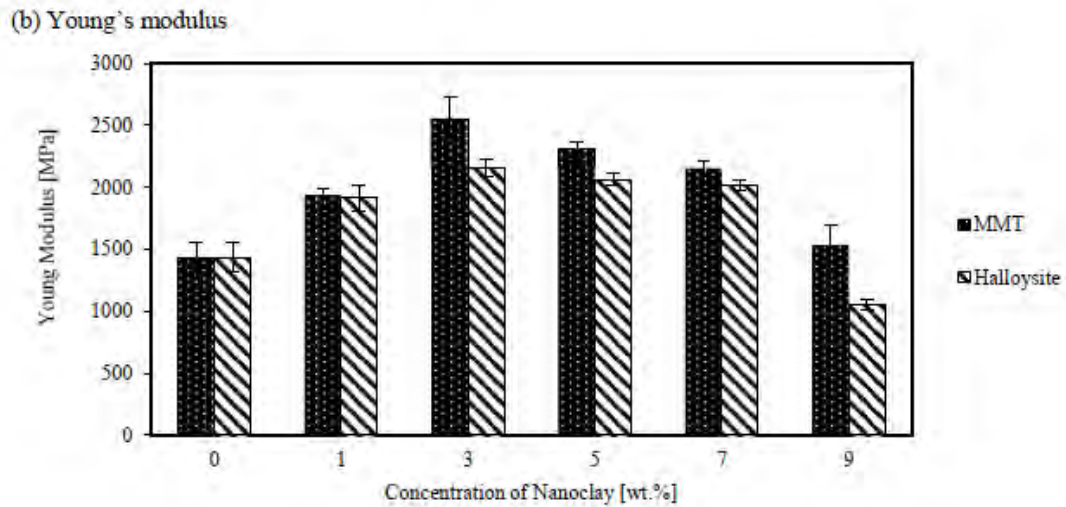


Figura 12. Módulo de Young para distintas concentraciones de MMT en los bionanocompuestos PLA/MMT.

Fuente: Othman et al. (2019).

Los films de bionanocompuestos a base de proteínas aisladas de soya y diferentes tipos de MMT (Cloisite 20A, Cloisite 30B, Cloisite Na⁺) realizados por P. Kumar et al. (2010a) muestran una estructura exfoliada para cantidades menores al 5% y estructuras intercaladas para cantidades mayores a 15%. Cuando la cantidad de MMT (Cloisite 20A y Cloisite 30B) es de 5% en el film del bionanocompuesto, este presenta los mejores valores de propiedades mecánicas (esfuerzo a tracción y elongación máxima), módulo de almacenamiento, temperatura de transición vítrea y propiedades barrera al agua en comparación a aquellos films solo realizados con MMT natural (Cloisite Na⁺). Además, se obtuvo valores similares de propiedades mecánicas a plásticos comerciales usados en los empaques de la industria alimenticia cuando la cantidad de Cloisite 30B era de 10%. Sin embargo, los altos valores de permeabilidad al vapor de agua obtenidos en estos films comparado a aquellos disponibles comercialmente podrían limitar su uso en la industria alimenticia a alimentos con alta humedad.

Para mejorar las bajas propiedades y alta sensibilidad al agua del almidón termoplástico, Derungs et al. (2021) utiliza MMT de distintos tipos. La MMT de origen natural Cloisite Na⁺ muestra mejores propiedades hidrofílicas, además de mostrar mejores resultados al incrementar su estabilidad térmica, dureza, propiedades mecánicas dinámicas (módulo de almacenamiento y temperatura de transición vítrea), así como su resistencia a la absorción

de agua en ambientes húmedos. La mejora de estas propiedades se debe sustancialmente a la buena dispersión de la MMT sobre la matriz de almidón, la cual mejoró gracias a la hidrofiliidad de esta nanoarcilla. Estos films se muestran como una alternativa en la industria de empaques.

1.10 Nanocompuestos Poliméricos Comerciales

Los nanocompuestos poliméricos a menudo demoran en ser lanzados comercialmente. Estos descubrimientos pueden tomar décadas en tomar un gran impacto comercial, como ha sucedido con materiales como el polietileno o los compuestos de fibra de carbono. Es también importante que estos materiales logren conseguir un equilibrio entre el costo y rendimiento para obtener una posición competitiva en el mercado.

El primer nanocompuesto polimérico fue inventado dentro de los laboratorios de Toyota Central R&D en 1985 (Okada & Usuki, 2006). Este nuevo material basado en nylon 6 con nanorefuerzos de arcilla híbrida atrajo la atención de todo el mundo científico por la nueva expansión de oportunidades que traía a la ciencia de polímeros y sus potenciales aplicaciones en las industrias automotrices, alimentarias y eléctricas. Fue lanzado comercialmente en 1990 como la cubierta de fajas de transmisión (*timing belt cover*) (Figura 13). Con solo una pequeña cantidad de peso en porcentaje de capas de aluminosilicatos uniformemente dispersadas sobre la matriz de nylon 6, los nanocompuestos mostraron una mejora superior en propiedades como alta temperatura de distorsión al calor y elevada rigidez comparado al nylon 6, además de propiedades mejoradas como la retardación a la llama e impermeabilidad a moléculas pequeñas de agua y oxígeno (Kawasumi, 2019).



Figura 13. Timing belt cover hecho de a base de nylon 6 y nanoarcilla híbrida.

Fuente: Kawasumi (2019).

Actualmente, el 32.8% de los nanocompuestos poliméricos en la industria son usados con nanoarcillas como nanorefuerzo principal (Reports and Data, 2021). Esto se debe a su versatilidad de uso en diversas industrias, además de su bajo costo y su procesamiento relativamente simple. De los tipos de nanoarcillas que existen, el más comercializado y estudiado es la MMT siendo usado mayormente por su superficie de área muy alta.

Los usos más comunes de los nanocompuestos en la industria son en los sectores de empaques, automotriz y recubrimientos según la estimación de mercado realizada por Camargo et al. (2009) en el año 2009. En el sector de empaquetamiento, con la valorización de mercado más alta (US\$ 671 millones), se utilizan los nanocompuestos para mejorar ciertas propiedades como biodegradables, barrera contra gases, permeabilidad, estabilidad térmica, entre otros; dependiendo del tipo de uso y la matriz polimérica. En el caso del PVC, se reconocen aplicaciones de nanocompuestos en la producción de láminas de PVC plastificado con el fin de obtener mejoras notables de resistencia al fuego y el módulo de elasticidad. Otro de los usos más regulares en esta

industria tiene como polímero al Nylon 6, donde se emplean los nanocompuestos para mejorar ciertas características como la mejora de barrera ante gases como oxígeno y CO₂, además de una mejora general de la rigidez. Investigaciones realizadas indican que este material al ser usado con un porcentaje mínimo de su peso en nanocompuestos (2% aproximadamente) logra alcanzar una mejora de hasta el doble como barrera ante el oxígeno a comparación del material convencional.

En la industria automotriz, con un valor de mercado de US\$ 631 millones, los nanocompuestos para la fabricación de componentes están hechos a base de Nylon 6 (Figura 14), Poliamida 6 o polipropileno. Estos permiten optimizar la resistencia a la deflexión ante altas temperaturas y la mejora de propiedades mecánicas en general (resistencia, módulo de Young). Los otros sectores donde se utilizan nanocompuestos cuentan con un menor tamaño de mercado como el sector de construcción (US\$ 276 millones), recubrimientos (US\$ 115 millones), industrial (US\$ 87 millones) y otros (US\$ 122 millones).

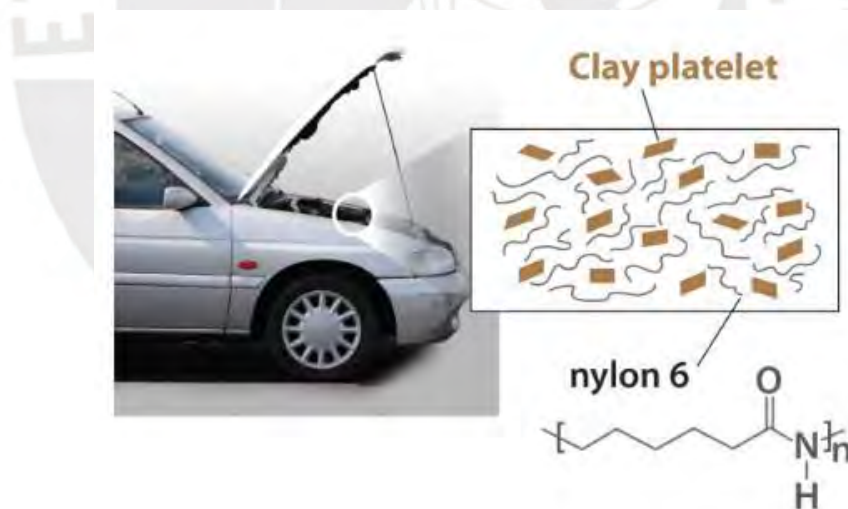


Figura 14. Uso del Nylon 6 en automóviles.

Fuente: Naskar et al. (2016).

La Tabla 1 muestra algunos ejemplos de nanocompuestos poliméricos usados comercialmente en diversas industrias (Paul & Robeson, 2008; Gul et al., 2016).

Tabla 1*Ejemplos de nanocompuestos poliméricos comerciales.*

Matriz Polimérica	Refuerzo (nanopartícula)	Propiedades mejoradas	Aplicaciones	Compañía proveedora y/o nombre comercial
Nylon 6 y copolímero Nylon 6/66	Nanoarcilla	Rigidez	Películas de barrera y Timing belt covers	Ube industries Japan/ Toyota
Termoplástico Poliolefina (TPO)	Nanoarcilla	Rigidez y resistencia	Revestimientos laterales de automóviles	General Motors
Nylon 6	Nanoarcilla	Barrera	Películas de barrera	Bayer AG
Epoxy	Nanotubos de carbono	Resistencia y rigidez	Raquetas de tenis	Babolat
Epoxy	Nanotubos de carbono	Resistencia y rigidez	Palos de hockey	Montreal: Nitro Hybtonite®
Etilenos vinílicos y copolímeros de acetato	Nanoarcilla	Resistencia y flexibilidad	Cables y alambres	Kabelwerk Eupen of Belgium
Polipropileno	Nanoarcilla	Barrera	Empaquetamiento	Clariant Technologies
Poliisobutileno	Nanoarcilla	Barrera de permeabilidad	Pelotas de tenis, pelotas de fútbol, neumáticos	InMat LLC
Caucho natural	Plata	Antimicrobiano	Diversos	No especificado
Epoxy/varios	MWCNT	Conductividad eléctrica	Disipación electrostática	Hyperion
Caucho natural, SBR, polibutadieno	Carbon black (partículas primarias: 20-100 nm)	Resistencia, desgaste y abrasión	Neumáticos	Varios
Nylon 6, polipropileno	Nanoarcilla	Barrera, permeabilidad, resistencia	Botellas, contenedores de cerveza, films	Nanocor (Imperm)

1.11 Bionanocompuestos Poliméricos

Los bionanocompuestos son nanocompuestos donde al menos una de sus fases es de origen natural. Por ejemplo, la matriz podría ser un biopolímero acompañado de nanorefuerzos en forma de nanotubos, nanopartículas o nanoláminas de origen sintético. Estos presentan propiedades biodegradables y biocompatibles, además de propiedades mejoradas como mecánicas, térmicas, de barrera y entre otras a comparación de los materiales producidos en base a un solo biopolímero.

En la literatura es muy común la aplicación de nanorefuerzos derivados de metales y carbono para reforzar la matriz biopolimérica para darle mejores propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. Famá et al. (2011) utiliza nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) sobre una matriz de almidón. Los resultados mostraron una buena dispersión y adhesión entre las fases en pequeñas cantidades de 0.027 wt% y 0.055 wt% de MWCNT, exhibiendo con esta última cantidad un aumento de la rigidez de un 70% y la resistencia a la tracción en un 35 % respecto al almidón puro.

Un bionanocompuesto con potenciales aplicaciones como micro-supercapacitores es desarrollado por Tian et al. (2019) a base de nanofibras de celulosa y MXene. La inclusión al 20 wt% de nanofibras de celulosa proporcionan la más alta resistencia a la tracción (341 MPa) y altas propiedades eléctricas como capacitancia (298 Fg^{-1}) y conductividad (295 Scm^{-1}). Existen más autores que han utilizado una gran variedad de nanorefuerzos en biopolímeros como el colágeno (Cheirmadurai et al., 2014; Meiyazhagan et al., 2015; Ding et al., 2022), gelatina (Mahmoud & Abbo, 2013; Fernandes et al., 2009; Le Ferrand et al., 2016), quitosano (Bai et al., 2012; Bouvree et al., 2009; Nengduo et al., 2016) y alginato (Shahzad et al., 2016; Bajpai et al., 2018) donde se optimizaron las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y ópticas respecto a los biopolímeros sin modificaciones (Colusso & Martucci, 2021).

1.12 Bionanocompuestos Poliméricos Elaborados en Perú

En el Perú, aprovechando la vasta biodiversidad presente, se han realizado diversos tipos de bionanocompuestos derivados de productos de origen marino como algas y moluscos;

de origen andino como papa, yuca, maíz, caña de azúcar, entre otros. Por ejemplo, Choque-Quispe et al. (2022) realiza un bionanocompuesto basado en almidón extraído de papas nativas con nanocrisales de celulosa extraídos de pancas de maíz (Figura 15), y se observa que conforme se aumenta la cantidad de estos nanocrisales (hasta 0.12%) los films presentan un incremento de actividad acuosa (de 0.409 a 0.447), índice de blancura (96.92-97.27), además de no observarse cambios significantes en la descomposición térmica durante el análisis termogravimétrico, demostrando que la inserción de nanocrisales de celulosa otorgan buenas propiedades térmicas y mecánicas, baja solubilidad y posee un potencial uso como material para el recubrimiento de alimentos.

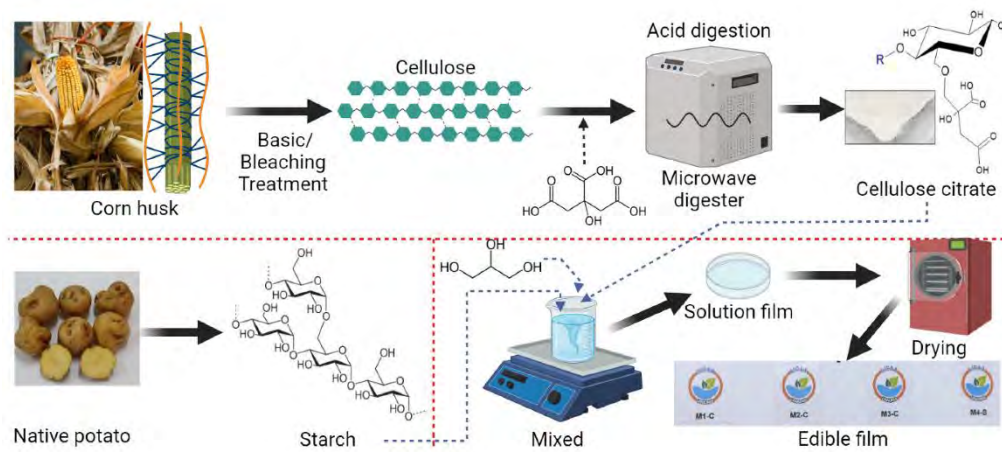


Figura 15. Proceso de elaboración de los films de almidón de papa y nanocrisales de celulosa.

Fuente: Choque-Quispe et al. (2022).

El Grupo de Investigación de Polímeros y Materiales Compuestos de la Pontificia Universidad Católica del Perú (POLYCOM) ha realizado durante años una extensiva línea de investigación con un enfoque en los bionanocompuestos de origen natural. Grande, Torres, Gomez, Troncoso, et al. (2009) desarrollaron un bionanocompuesto elaborado con celulosa bacteriana como matriz reforzada con nanorefuerzos de almidón de maíz y papa. El objetivo de este estudio fue introducir una nueva metodología para producir nanomateriales introduciendo una fase distinta a la red de nanofibras de celulosa,

resultando que la cristalinidad de la celulosa bacteriana no ha sido afectada ante la adición de almidón, por lo que las propiedades mecánicas del nanocompuesto no presentaron un decremento. Ccorahua et al. (2017) fabricaron un bionanocompuesto de celulosa bacteriana con nanorefuerzos de óxido de grafeno a través de un método de hidracina (Figura 16) en su estructura removiendo los grupos hidroxilos y epóxicos en el óxido de grafeno reducido, donde lograron incrementar la conductividad hasta 12 S/m comparado a los films de solo celulosa bacteriana que se comportan como materiales aislantes. Por otro lado, Torres et al. (2019) también estudiaron como mejorar las propiedades eléctricas de estos bionanocompuestos dopándolo con sales de yoduro de amonio (NH_4I) donde el valor de conductividad más alta se obtuvo al dopar las muestras al 5% ($1.32 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$). También fueron desarrollados bionanocompuestos de bacteria celulosa con almidón manteniendo sus propiedades mecánicas y explorando una nueva metodología para producir nanomateriales con la introducción de una nueva fase en las nanofibras de celulosa durante su realización (Grande, Torres, Gomez, Troncoso, et al., 2009). En otro estudio, se pudo extraer carragenina a partir de las algas *Chondracanthus chamissoi* para realizar films de esta reforzada con nanowhiskers de quitina y utilizadas como sustratos de células para potenciales aplicaciones biológicas (Corvaglia et al., 2016).

Una breve revisión de otros bionanocompuestos desarrollados por este grupo y otros en el país se puede ver en la Tabla 2.

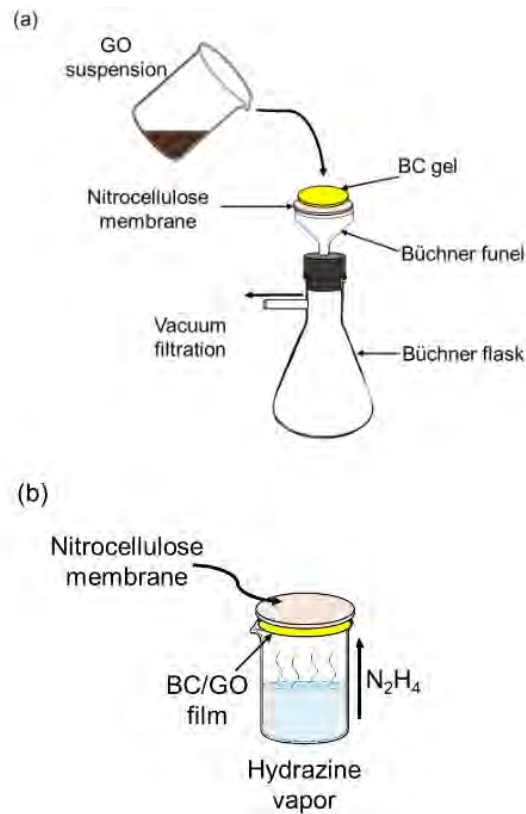


Figura 16. Figura representativa del método de preparación de bionanocompuestos de celulosa bacteriana a través del método de hidracina.

Fuente: Ccorahua et al. (2017)

Tabla 2

Bionanocompuestos elaborados en Perú.

Bionanocompuesto	Propiedades	Aplicaciones	Referencia
Celulosa bacteriana / hidroxiapatita	Biocompatibilidad y viabilidad celular	Biomédica	Grande, Torres, Gomez, & Carmen Bañó (2009)
Carboxymethyl chitosan / Ag nanopartículas	Antibacteriano	Biomédica	Quispe-Quispe et al. (2022)
Exopolisacáridos / nanowhiskers de quitina	Sustrato de células, aumenta propiedades mecánicas y rugosidad	Biomédica	Rodríguez et al. (2018)

Exopolisacáridos / nanopartículas de almidón	Sustrato de células	Biomédica	Rodríguez et al. (2018)
Carragenina/ MMT	Propiedades mecánicas más altas al 5% de MMT	Industria alimentaria / Biomédica	S. A. Rodriguez et al. (2016)
Carragenina / nanowhiskers de quitina	Aumento de propiedades mecánicas hasta 15% de nanorefuerzos	Industria alimentaria / Biomédica	S. A. Rodriguez et al. (2016)



CAPITULO 2 MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1 Nostoc Commune

Las cianobacterias de *N. Commune* son recogidas del lago Cushurbamba (Áncash, Perú). Comercialmente, su venta está disponible en diversos mercados a nivel nacional como alimento por su elevado valor nutricional. El *N. commune* utilizado para la fabricación de los films fue adquirido de los mercados de los distritos de Magdalena y Puente Piedra (Lima, Perú) tal como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Imagen representativa del cushuro (*N. Commune*) siendo comercializado en el mercado de Magdalena (Lima, Perú).

2.1.2 Nanoreforzos

El nanoreforzo a utilizar será la montmorillonita en forma de polvo (Sigma Aldrich, USA). Esta se puede observar en la Figura 18.



Figura 18. Montmorillonita. Presentación de 500 g (Sigma Aldrich, USA).

2.2 Proceso de Obtención de Exopolisacáridos

2.2.1 Tratamiento y Limpieza

El primer paso para tratar el *N. commune* fue la limpieza con abundante agua, siendo el último lavado con agua destilada.

2.2.2 Extracción de *Nostoc Commune*

Para la elaboración de los exopolisacáridos, se colocó el *N. commune* en un medio acuoso de NaOH, el cual debe ser preparado a 0.1 M.

- Preparación de NaOH 0.1 M

Para 0.1 M se necesita determinar la cantidad de NaOH (en g) a utilizar en 2 L de agua destilada.

$$M = \frac{n}{V} \dots (I)$$

Donde:

M = molaridad

n = número de moles

V = volumen (L)

Además, se sabe:

$$n = \frac{m}{PM} \dots (II)$$

Donde:

m = masa (g)

PM = peso molecular (en g/mol)

Reordenando (II) en (I), M se puede expresar también como:

$$M = \frac{m}{PM * V} \dots (III)$$

Se sabe:

M = 0.1

PM = 40 g/mol (NaOH)

$$V = 2L$$

Resolviendo, en (III):

$$m = 8 g$$

Se necesitó 8 g de NaOH preparar la solución de NaOH 0.1 M (pH=13). Esta cantidad de NaOH se encuentra en forma de pellets. Dicha cantidad es depositada en los 2 L de agua destilada y llevada a girar a 350 rpm en un agitador magnético durante cinco minutos hasta que la solución se encuentre lista para usar.

El siguiente paso fue colocar en un balón de destilación 150 g de *N. commune* con 700 mL de NaOH. Se repitió este proceso para otro balón de destilación y se procedió a armar el circuito de reflujo, como se ve en la Figura 19.



Figura 19. Imagen representativa del circuito de reflujo.

El circuito de reflujo ayudó a que el contenido en el interior de los matraces de fondo redondo no se pierda por la evaporación mientras eran girados a 350 rpm y a una temperatura de 60°C sobre las cocinillas FISATOM 725A. El agua fría pasa por el interior de las mangueras flexibles para luego recorrer los tubos helicoidales, de esta manera se produce el reflujo y se evita que los vapores escapen hacia el ambiente. Este circuito fue puesto a funcionar durante 5 horas.

Luego del reflujó, se procedió a realizar un filtrado de doble malla al contenido dentro de los balones de fondo redondo. En ambos envases se obtuvo el *N. commune* en el medio de NaOH, en un contenido aproximado de 800 mL. El siguiente paso fue la reducción de este contenido hasta 350 mL para concentrar de una mejor manera el *N. commune*. Esto se realizó colocándolo en un agitador magnético a 65°C durante 10 horas.

Una vez reducido el contenido hasta la cantidad deseada, el siguiente paso es la precipitación. En un vaso de 2 L se colocó 700 mL de isopropanol, la cantidad de isopropanol se da en una relación 2:1 respecto a la cantidad de *N. commune* que se ha reducido en el paso anterior de reducción. Se realizó la precipitación colocando el vaso con isopropanol en un baño frío. Con ayuda de una bagueta de laboratorio se agregó lentamente el medio de extracción. Se dejó en reposo durante 4 horas en refrigeración. Luego de este tiempo se puede apreciar el precipitado formado, de una textura esponjosa y color marrón claro (Figura 20).



Figura 20. Vista del precipitado del exopolisacárido formado.

El precipitado formado es retirado con cuidado del vaso, se coloca en petris (90 x 15 mm) y es llevado a secar a un horno a 40°C durante 48 horas hasta observar que el líquido presente se haya evaporado por completo. El resultado serán los exopolisacáridos de *N. commune* que son pesados para ver la cantidad obtenida.

Por último, los exopolisacáridos fueron llevados a un proceso de trituration para reducir su tamaño (Figura 21). De esta manera, se obtuvo los exopolisacáridos a partir del *N. commune*, pudiendo ser conservados a temperatura ambiente en un recipiente cerrado para su posterior uso en el procesamiento de films con este biopolímero.



Figura 21. Trituración del exopolisacárido.

El diagrama de procesos realizados se puede observar en la Figura 22.

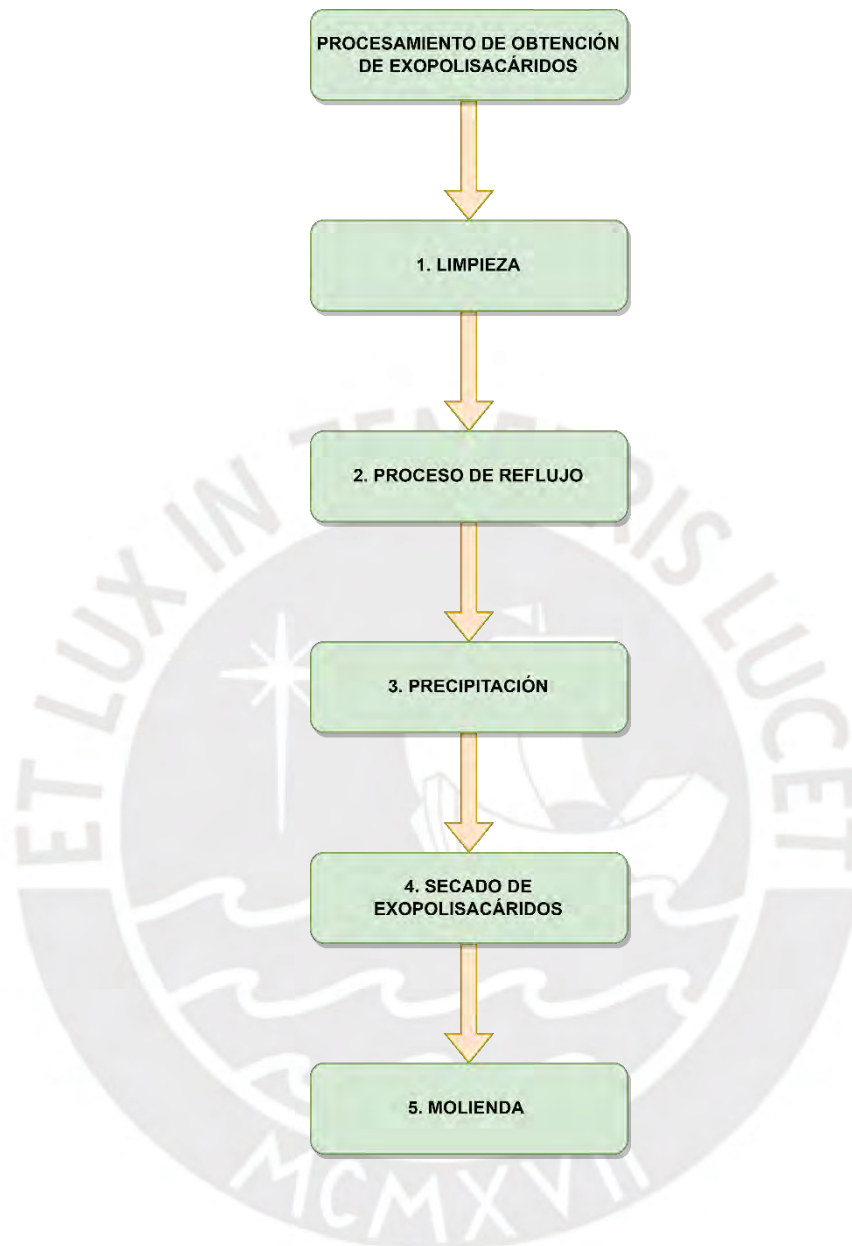


Figura 22. Diagrama de procesos para la obtención de exopolisacáridos.

2.3 Preparación de Bionanocompuestos

Se realizó diferentes tipos de bionanocompuestos en forma de films. Por un lado, films hechos a base de *N. Commune* con glicerol (NC/Glicerol). Los otros films son a base de *N. commune* con nanorefuerzos de montmorillonita (NC/MMT) a diferentes cantidades de MMT.

2.3.1 *Nostoc Commune* y Glicerol

Se tomó como principal referencia el método de preparación de S. Rodriguez et al. (2017). El uso de glicerol en la preparación de films de *N. commune* sirve para dar flexibilidad y mejores propiedades en general a comparación de los films preparados sin este plastificante, en donde se observa una tendencia frágil y quebradiza en este último.

Se preparó los films con las cantidades mostradas en la Tabla 3. Por lo que las muestras de este tipo deben mantener la misma proporcionalidad en cada una de ellas.

Tabla 3

Cantidades de componentes del NC/Glicerol.

	EPS (% w/v)	Glicerol (% w/w)
NC/Gli	1	10

El primer paso para la preparación de estos films fue la colocación de 100 mL de agua destilada junto a 1 g del exopolisacárido de *N. commune* en un envase de vidrio con un magneto, llevados a girar en un agitador magnético a 350 rpm y 80°C durante 12 h (Figura 23). Este proceso ayudó a que se pueda disolver el exopolisacárido en el agua destilada para la preparación de films.



Figura 23. Disolución de 1g de exopolisacárido de *N. commune* en 100 mL de agua destilada a 350 rpm y 80°C en un agitador magnético.

Luego, para obtener mejores resultados y separar impurezas, se filtró con una doble malla para remover impurezas y los restos de los exopolisacáridos restantes. Una vez filtrado, se llevó a una centrifugadora a 8000 rpm durante 8 minutos. Posteriormente, se realizó de nuevo un filtrado con doble malla.

La solución restante luego de los procesos de filtrado es separada en envases de 50 mL c/u para la preparación de los films de NC/Glicerol. En cada envase había 0.5 g de exopolisacárido, por lo que a cada muestra le correspondía 0.1 g de glicerol.

Posteriormente, cada envase de 50 mL del exopolisacárido disuelto es colocado a girar en un agitador magnético con la ayuda de un magneto. Se realizó el pesado de 0.1 g de glicerol en una balanza y se agregó dicha cantidad al exopolisacárido para ser colocado a girar durante diez minutos a 350 rpm.

Finalmente, la solución NC/Glicerol de cada envase se distribuyó en 2 petris (100 x 15 mm) en cantidades iguales (Figura 24, a) y estos fueron llevados a secar en una estufa a 40°C alrededor de 48-72 horas. Para verificar si el film estaba listo para retirarse se

observó que la variación del peso no fuera significativa. De esta manera, se confirmaba que se ha evaporado completamente el agua de la solución (Figura 24, b).

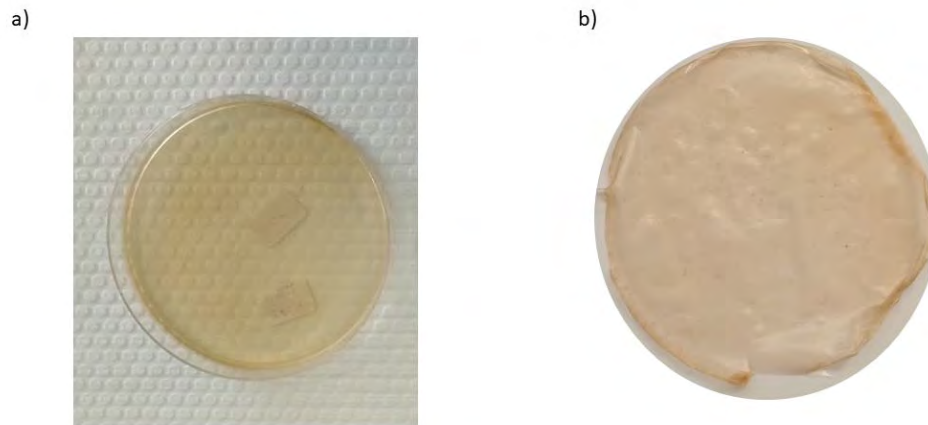


Figura 24. a) NC/Gli en un petri antes del secado. b) Obtención del film de NC/Gli luego del secado.

2.3.2 Nostoc Commune y Montmorillonita

Los bionanocompuestos con montmorillonita (NC/MMT) fueron elaborados mediante un método propio que toma de referencia los métodos utilizados por S. Rodriguez et al. (2017) y Vaezi et al. (2019).

Se realizó cuatro tipos de muestras, con diferentes cantidades de MMT, según lo mostrado en la Tabla 4. Los % w/w son respecto al peso del EPS utilizado.

Tabla 4

Cantidades de componentes del nanocompuesto NC/MMT.

	EPS (% w/v)	Glicerol (% w/w)	MMT (%w/w)
NC/MMT 1%	1	10	1
NC/MMT 2%	1	10	2
NC/MMT 5%	1	10	5
NC/MMT 7%	1	10	7

Para la disolución de EPS en cada muestra se realizó el método descrito anteriormente en los films hechos a base de *N. commune* con glicerol. Se disolvió 1 g de EPS en 75 mL de agua destilada durante alrededor de 8 horas a 80°C a 350 rpm en un agitador magnético hasta que esta cantidad se redujo a 50 mL. El EPS disuelto es luego pasado por un filtro de doble malla, y llevado a una centrifugadora a 8000 rpm durante 8 minutos. Se extrajo el exopolisacárido disuelto y es pasado nuevamente por un filtro de doble malla. Luego, a los 50 mL disuelto se le agregó la cantidad de glicerol respectiva y se dejó en agitación a 360 rpm durante 10 minutos utilizando un agitador magnético para lograr que el glicerol se disuelva completamente en la solución.

Por otro lado, se pesó la MMT en una balanza según el tipo de muestra y se le adicionó en 50 mL de agua destilada a alta velocidad (700 rpm) en un agitador magnético por unos 10 minutos. Pasado este tiempo, se sonicó la muestra cinco veces con la ayuda de un sonicador para obtener una mejor dispersión bajo los siguientes parámetros: 350 rpm, 60 W, durante cuatro minutos cada sonicación.

Finalmente, la MMT fue llevada a dispersar en el EPS en un agitador magnético a 700 rpm durante cinco minutos. Para obtener una buena dispersión, el nanorefuerzo es agregado muy lentamente sobre la matriz mediante goteo utilizando una pipeta de transferencia de punta fina.

Finalmente, los bionanocompuestos fueron depositados en petris y llevados a una estufa a 40°C durante 48-72 horas, obteniéndose de esta manera los films (Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28).

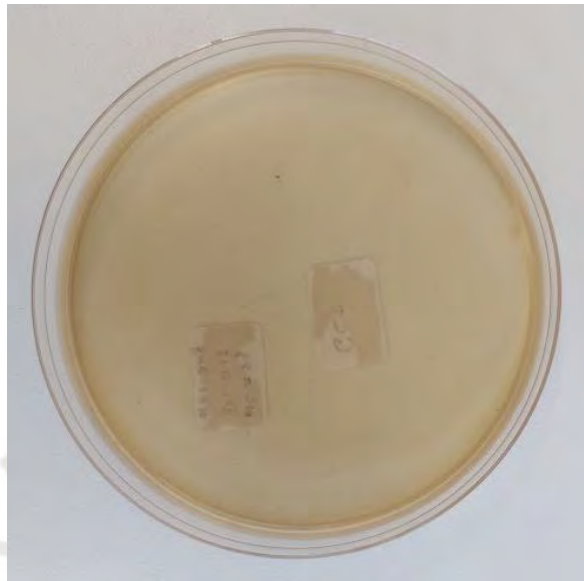


Figura 25. Film del nanocompuesto NC/MMT 1%.

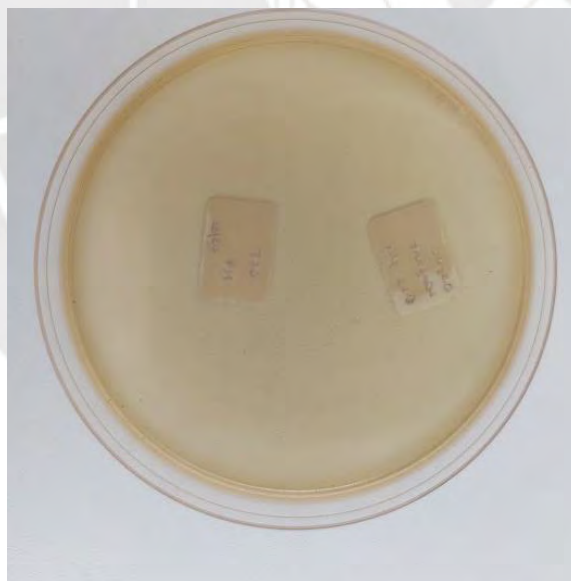


Figura 26. Film del nanocompuesto NC/MMT 2%.

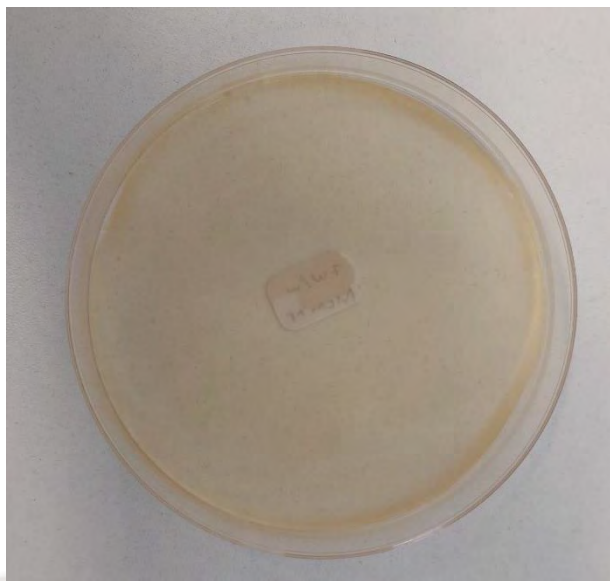


Figura 27. Film del nanocompuesto NC/MMT 5%.



Figura 28. Film del nanocompuesto NC/MMT 7%.

2.4 Ensayos de Caracterización

2.4.1 Dispersión de Luz Dinámica (DLS)

La caracterización de dispersión de luz dinámica es una de las técnicas más comunes para el análisis del tamaño de partículas y su distribución desde el rango nanométrico hasta varios micrones. Es utilizada por ser una técnica no invasiva, rápida y solo requiere una cantidad mínima de muestra para el ensayo (Ross Hallett, 1999). Mide la interferencia de luz de acuerdo con el movimiento browniano de las partículas que se encuentran en una suspensión acuosa o fisiológica y la relación de velocidad de estas a través del coeficiente de difusión D y su diámetro hidrodinámico utilizando la ecuación de Stokes-Einstein. El índice de polidispersidad (PDI) es la manera de medir evaluar el rango de la distribución del tamaño de partículas. Este valor está entre 0-1, donde el máximo valor indica que existe una alta concentración de partículas heterogéneas y el mínimo valor indica una alta concentración de partículas del mismo tamaño (A. Kumar & Dixit, 2017).

Para determinar el diámetro promedio y la distribución del tamaño de las nanopartículas de MMT se utilizó el equipo DLS Malvern Zeta Sizer (Figura 29). La preparación de la muestra se hizo sonicando 10 mg de MMT en 50 mL de agua destilada. Aproximadamente 10 mL de esta dispersión es colocado en la probeta de ensayo del DLS a una temperatura ambiente de 20°C. Se realizó tres ensayos de 50 lecturas cada uno.

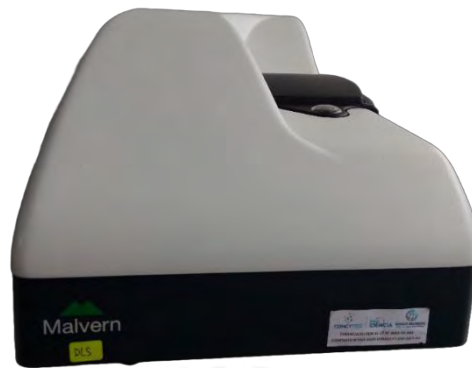


Figura 29. DLS Malvern Zeta Sizer

2.4.2 Caracterizaciones Estructurales: FTIR – ATR

Para las caracterizaciones estructurales se realizaron ensayos usando la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con el accesorio de reflexión atenuada total (ATR) lo que permite el análisis de muestras de manera no destructiva para distinguir sus componentes y propiedades químicas. Se utilizó el equipo FTIR Spectrum Two de la marca Perkin Elmer (Figura 30) con su respectivo accesorio ATR. Las muestras fueron cortadas en pequeños trozos cuadrangulares de 0.5 cm y se colocaron en el accesorio FTIR, donde se obtuvieron los espectros en un rango de número de onda de 500 hasta 4000 cm^{-1} con resolución de 8 cm^{-1} , 8 barridos. Los ensayos fueron realizados con una temperatura ambiente de 20°C.



Figura 30. Espectrómetro FTIR Perkin Palmer modelo Spectrum Two con accesorio ATR.

2.4.3 Caracterizaciones Térmicas

- **Análisis Termogravimétrico (TGA)**

Para los ensayos de análisis termogravimétrico se utilizó el equipo Perkin-Elmer TGA 4000 (Figura 31). Los films fueron cortados en pequeños trozos circulares para colocarlos en los crisoles de ensayo y donde cada muestra tenía que pesar alrededor de 10 mg. Los parámetros para el ensayo fueron una velocidad de 10°C/min y un rango de temperaturas de 30°C a 600°C. La atmósfera de trabajo inerte fue el nitrógeno seco con un caudal de 20 mL/min.



Figura 31. Equipo Perkin-Elmer TGA 4000.

- Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Los ensayos de calorimetría diferencial de barrido fueron realizados en el equipo Perkin-Elmer DSC 4000 (Figura 32). Los films fueron cortados en trozos circulares y se colocaron en panes de aluminio, donde su peso debía ser aproximadamente 10 mg. El rango de temperatura de trabajo fue de 0 °C a 250°C. El nitrógeno fue el gas utilizado para la atmósfera con un caudal de 20 mL/min. Los pasos realizados durante la prueba fueron:

- Enfriamiento de 30°C a 0°C a 30°C/min.
- Se mantuvo a 0°C durante cinco minutos.
- Calentamiento de 0°C a 250°C a 10°C/min.



Figura 32. Equipo Perkin-Elmer DSC 4000

2.4.4 Caracterización Morfológica

- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

El SEM es un microscopio de electrones que se utiliza de manera común para producir imágenes sobre la micro-nano estructura y morfología de muestras sólidas utilizando un rayo de electrones. Estos electrones interactúan con los átomos del material produciendo las múltiples señales y que son detectadas dependiendo del tipo de modo que se esté utilizando el SEM (Raghavendra & Pullaiah, 2018). Uno de las principales ventajas del SEM es su resolución de 10 nm, incluso llegando a 2.5 nm en los equipos más avanzados (Raval et al., 2019). Existen diferentes modos de SEM como las imágenes por electrones secundarios, mapeo de rayos X, imágenes por electrones retrodispersados y canalización de electrones (Omidi et al., 2017).

La caracterización se hizo en un microscopio electrónico Horiba Quanta 650 (Figura 33) en alto vacío con un voltaje de 25 kV. Las muestras fueron recubiertas en oro usando un Sputter Coater Polaron SC7640.



Figura 33. SEM Horiba Quanta 650.

2.4.5 Caracterizaciones Mecánicas

Las caracterizaciones mecánicas fueron ensayos a tracción regidos bajo la norma ASTM D882 para films delgados con un espesor menor a 1 mm. De acuerdo a la norma, los films fueron cortados en pequeñas probetas de 5mm de ancho (ancho mínimo) y 60 mm de espacio entre mordazas (espacio mínimo de 25 mm). Los ensayos fueron realizados en la máquina de ensayos a tracción ESM Mark-10 equipado con una celda de carga de 10 N ($\pm 0.5\%$) ilustrado en la Figura 34. Los films presentan una textura delgada y elástica. El espesor de los films fue medido con un micrómetro Mitutoyo de 0-25 mm con una precisión de 0.01 mm. Las mediciones se realizaron en 3 puntos a lo largo de la probeta y se tomó el espesor promedio para fines de cálculo. La cantidad de pruebas realizada fue de cinco veces (la norma recomienda un mínimo de tres ensayos) a una velocidad mínima de 10 mm/min de avance según ensayos realizados previamente (Torres et al., 2011). El software que recopiló los datos del ensayo de la máquina de ensayos a tracción fue el MESUR™ Lite.

La temperatura ambiente en la que se realizaron las pruebas fue de 21.5°C. Los resultados obtenidos a partir de los datos dados por el programa fueron la resistencia a la tracción (σ) y deformación (ϵ). Esto permitió la realización de una gráfica de esfuerzo vs. deformación para determinar también el módulo de elasticidad (E) para cada muestra.



Figura 34. Máquina de ensayos a tracción Mark-10.

CAPITULO 3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analiza las propiedades mecánicas, térmicas, fisicoquímicas y morfológicas de los bionanocompuestos una vez obtenidos los films. Para esto se realizan las caracterizaciones respectivas que permites conocer las distintas propiedades de los materiales.

3.1 Extracción de *Nostoc Commune*

El rendimiento de la extracción de los exopolisacáridos producidos se calculó según lo propuesto por H.-B. Wang et al. (2014):

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{W_2}{W_1} \times 100$$

Donde W_1 representa la cantidad de *N. commune* en peso sólido antes de la extracción y W_2 es la cantidad en peso de EPS de *N. commune*. Para el cálculo de la cantidad de sólido antes de la extracción, el contenido de humedad promedio se asumió en un promedio de 95% (H.-B. Wang et al., 2014; S. Rodriguez, 2016).

La Tabla 5 muestra las cantidades obtenidas de exopolisacáridos de *N. commune* en diferentes extracciones y su % de rendimiento según el método descrito anteriormente. Se obtuvo un rendimiento promedio de extracción de 34.53% respecto a la cantidad en

peso seco (sin humedad) del *N. commune*. Este valor se encuentra dentro del rango promedio de 30-40% reportado por Z. Huang et al. (1998).

Tabla 5

Rendimiento de la extracción de Nostoc Commune.

Peso de <i>N. commune</i> pre-extracción (g)	Peso del EPS (g)	Rendimiento de la extracción (%)
150	1.575	21.00
150	3.084	41.12
125.7	2	31.82
150.1	1.8	23.98
150.7	3	39.81
165	3.42	41.45
150.6	3.2	42.50
Rendimiento Promedio		34.53±8.98

3.2 Dispersión de Luz Dinámica – DLS

Los resultados de los ensayos de DLS aplicado a la MMT se pueden observar en la Tabla 6. Se obtuvo un tamaño de diámetro promedio de 418 nm entre todas las mediciones. Dicho tamaño pertenece a la dimensión lateral de las capas de MMT, las cuales pueden ser de cientos de nanómetros hasta varias micras (Alexandre & Dubois, 2000). Esto es debido a la estructura en capas 2:1 que presenta la MMT, haciendo referencia al ordenamiento de sus capas atómicas que consisten en hojas estructuradas, dos tetraédricas y una octaédrica en el medio de estas. Es la unión de estas capas a través de fuerzas de van der Waals y cationes que origina las características distintivas de la MMT, su espesor delgado de alrededor de 1 nm debido al arreglo molecular de estas hojas y las largas dimensiones laterales que otorgan una relación de aspecto elevada (Jemai et al., 2024; X. Liu et al., 2008 ; Novich & Ring, 1984). Las dimensiones de estas capas también

dependen de la naturaleza de la fuente de la arcilla, el silicato y el método de preparación (Arrieta et al., 2017).

En la Figura 35 se observa los resultados de uno de los tres ensayos de DLS realizados a esta nanoarcilla.

Tabla 6

Resultados de ensayos de DLS de montmorillonita.

	PDI	Z average (d.nm)
Medición 1	0.247	428.7
Medición 2	0.035	412.8
Medición 3	0.073	413.1
Z promedio		418.2±9.09

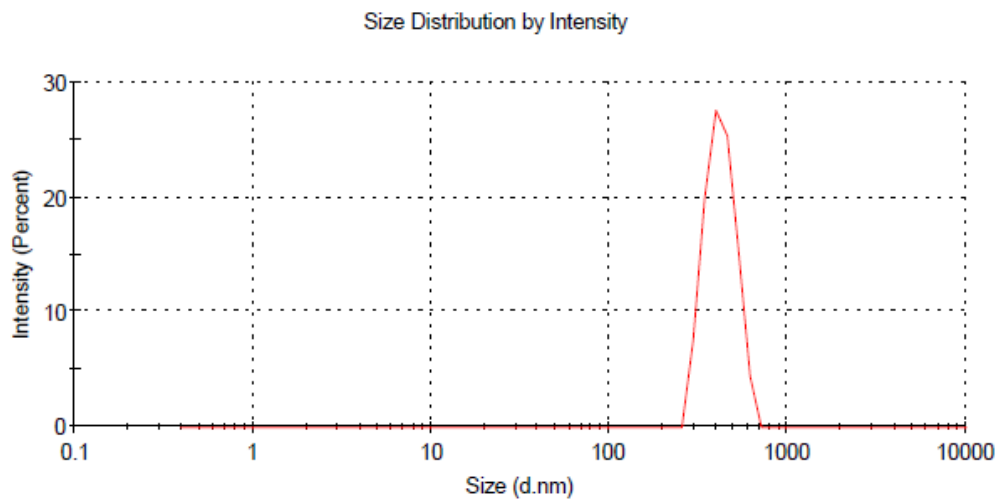


Figura 35. Resultados de DLS de la montmorillonita.

3.3 Caracterización Estructural: FTIR – ATR

En la Figura 36 se puede observar los espectros FTIR para todos los films realizados (NC/Glicerol, NC/MMT). Los espectros mostrados de cada muestra presentaron un similar comportamiento y sus curvas no mostraron diferencias notables, lo que indica que poseen vibraciones moleculares semejantes, por ende, los mismos grupos funcionales. Esto también puede indicar que los nanorefuerzos de MMT no afectan de manera significativa dichos grupos funcionales.

En la sección de la gráfica donde se pueden reconocer los grupos funcionales con mayor claridad ($\geq 1500 \text{ cm}^{-1}$) se pudo observar un primer pico notable, de manera ancha, a 3281 cm^{-1} lo que representa la existencia de fuertes uniones intermoleculares correspondientes al grupo de los alcoholes -OH, característica típica de una fuerte molécula de polisacárido o de hidrógeno intermolecular presente (Y. Wang et al., 2019). Autores como Lakshmidevi et al. (2022) también mencionaron que se debe a la presencia de polifenoles en el caso del *N. sphaericum*, cianobacteria similar al *N. commune*.

El siguiente pico, observado entre $2884\text{-}2934 \text{ cm}^{-1}$ es atribuido a las vibraciones de tensión de los grupos -CH (CH₂, CH₃) que es común de los ácidos grasos poliinsaturados de diversas especies de *Nostoc* (Temina et al., 2007). Otro pico observado a 1596 cm^{-1} se atribuyó a la presencia de grupos carboxilos C=O presentes en las proteínas. Este grupo también es identificado por autores como Ansari & Fatma (2016) y Gopi (2014) en moléculas PHB derivadas de otras especies de *Nostoc* con un pico similar que corresponde a la energía de vibración de la unión de un éster.

La siguiente sección de la gráfica ($\leq 1500 \text{ cm}^{-1}$) se puede reconocer como el área de la huella dactilar de la muestra. Cada grupo reconocido es comparado con estudios similares de *Nostoc*, pues no se puede tener una completa certeza de la presencia de dichos grupos al ser único para cada muestra.

Los picos de baja intensidad observados entre $1404\text{-}1364 \text{ cm}^{-1}$, se atribuirían a las vibraciones de flexión características correspondientes de los grupos -CH, siendo un pico típico debido a la presencia de carbohidratos (Lakshmidevi et al., 2022; Y. Wang et al., 2019).

Se observó otro pico notable a 1028 cm^{-1} el cual se atribuiría a los estiramientos de vibraciones correspondientes a los enlaces C-O-C. Investigadores como Torres-Maza et al. (2020); S. Rodriguez et al., 2017) indicaron que estos enlaces son típicos de las unidades de glucosa. Específicamente, un anillo de piranosa dentro de un enlace éter (Y. Wang et al., 2019), que también se puede deber a las vibraciones de los estiramientos de C-O-H en dichos anillos (X. Wang et al., 2022).

El pico alrededor de 915 cm^{-1} , de acuerdo con Y. Wang et al. (2019), puede ser un pico de absorción que se puede deber a leves vibraciones de estiramiento de C-O-C. También se podría atribuir a la presencia de enlaces β -glucosídicos según otros autores (S. Rodriguez et al., 2017; X. Wang et al., 2022; Jia et al., 2007). El siguiente pico, alrededor de los 838 cm^{-1} también puede estar asociado a dichos enlaces β -glucosídicos, aunque también se puede atribuir a la presencia de unidades de glucopiranosas. Estos enlaces alrededor de estos picos también se han encontrado en otras especies *Nostoc*, por ejemplo, en el *Nostoc sphaericum*, pero también en otros exopolisacáridos como el pululano y el alginato (Alvarez et al., 2021).

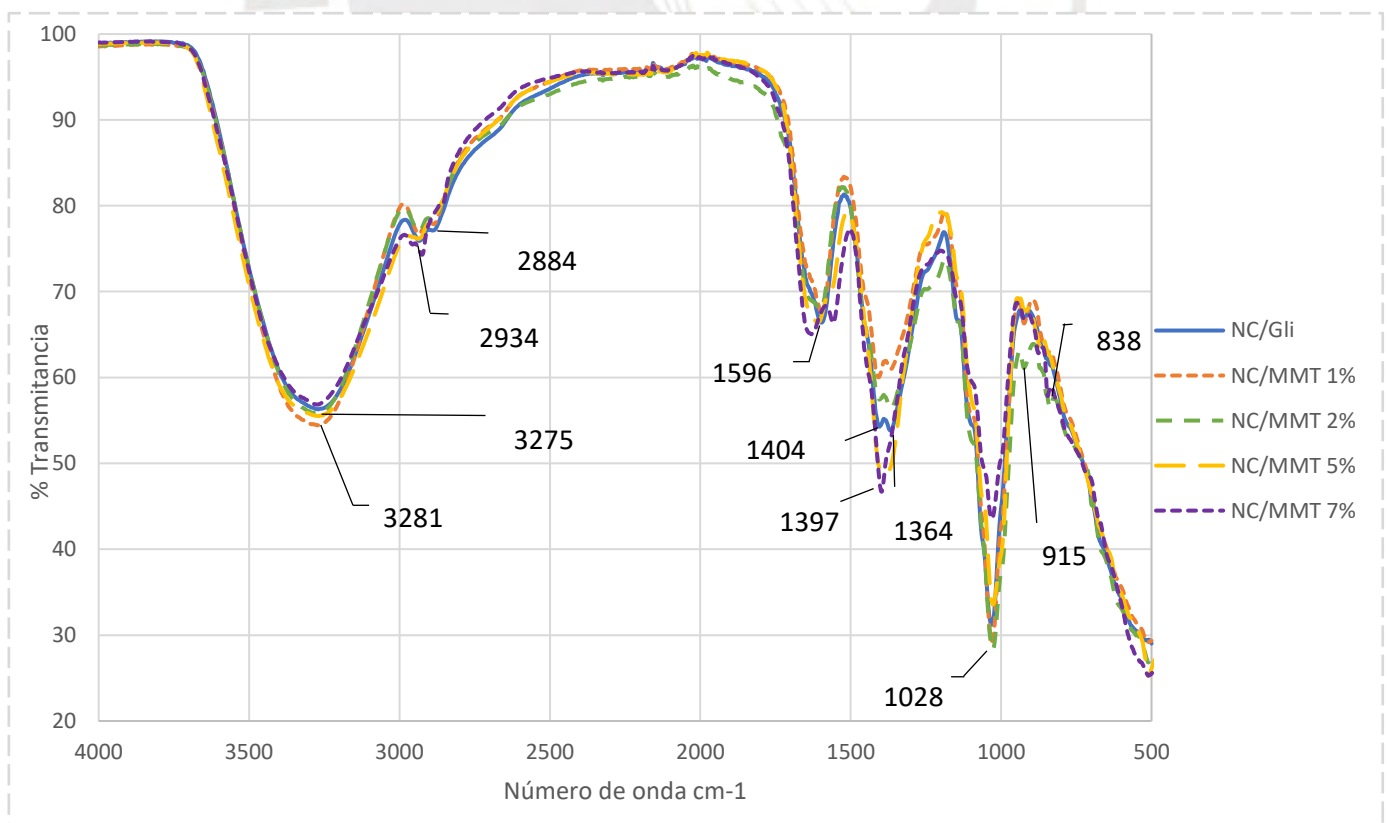


Figura 36. Figura representativa del espectro FTIR de los films de NC/Glicerol, NC/MMT 1, 2, 5 y 7%.

El análisis FTIR permitió distinguir que tanto en las muestras de *N. commune* con glicerol como en aquellas con diferentes cantidades de nanorefuerzos de MMT existe la posible presencia de grupos hidroxilos, polifenoles, hidrocarburos, polisacáridos carboxilos, unidades de glucosa (anillos de piranosa) unidos bajo enlaces β -glucosídicos. Esto permitió verificar la posible presencia de ciertos compuestos como carbohidratos, polisacáridos, lípidos, proteínas y ácidos grasos en la composición del *N. commune* (Hori et al., 1990; Torres-Maza et al., 2020; Ponce, 2014).

Se pudo evidenciar también un aumento en los enlaces del grupo O-H cuando aumentaba las cantidades de MMT, esto podría traducirse en la influencia de las propiedades que tiene el bionanocompuesto para aceptar las moléculas de agua de una mejor manera, mejorando su solubilidad (R. Wang et al., 2021). Además, se observó un decrecimiento leve en las bandas correspondientes a las vibraciones de estiramientos C-H debido a la inserción de plastificante y MMT. La inserción de plastificantes como el glicerol permitió que los films puedan mejorar sus propiedades hidrofílicas (Cerqueira et al., 2012; Guidara et al., 2020) al igual que la montmorillonita (Zhu et al., 2019).

La presencia de oxígeno en los azúcares y grupos hidroxilos en la estructura de los films provoca una alta actividad de los radicales de los hidroxilos que produce una acción antioxidante. La presencia de actividad antioxidante hace que pueda tener un potencial uso en aplicaciones biomédicas como recubrimientos (Rhim & Wang, 2014; NINOMIYA et al., 2011). Otra característica importante para aplicaciones biomédicas es su capacidad de retención a la humedad que está asociada a su estructura química (Li et al., 2011).

3.4 Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC)

Las curvas DSC para los films de NC/Glicerol y NC/MMT a distintas cantidades se puede observar en la Figura 37. El historial térmico de estas curvas va desde los 0°C hasta los 250°C para observar los cambios que presentan en este rango de temperaturas. Para todos los films caracterizados, se pudo apreciar que los picos endotérmicos presentados están

en un rango muy cercano de temperaturas, esto es, entre 113°C y 135°C. La presencia de este pico está atribuida a la posible deshidratación y evaporación de agua presente en los films (Bomeni et al., 2018; Sohn & Han, 2006). En las muestras analizadas, no se puede observar que la adición de MMT tenga un cambio térmico notable en este proceso, por lo que se puede deducir que esta no afecta de manera notable sus propiedades de degradación relacionados a la evaporación y deshidratación. Un similar comportamiento se observa en matrices de biopolímeros como la carragenina (Zakuwan & Ahmad, 2019) y almidón-PVA (Calambas et al., 2021) cuando se agregan diferentes cantidades de MMT. La diversidad de estos picos realizada para todos los films demostró que la composición del *N. commune* es la de un exopolisacárido complejo, de la cual se han reportado muy pocas investigaciones sobre el comportamiento térmico de estos. No se observó una transición vítrea en la caracterización realizada en esta tesis, así como picos que hayan demostrado la fusión del material. La presencia de azúcares en los exopolisacáridos hizo que sea difícil la detección de una transición vítrea debido a los bajos valores de transición de calor (Mitsuiki et al., 1998). En la elaboración de films de *N. commune* realizada por S. Rodriguez et al. (2017) se pudo encontrar una transición vítrea alrededor de -25.5°C (T_g) con un $\Delta C_p = 0.03$ W/g sin picos de fusión, lo que muestra un comportamiento térmico típico de los materiales que presentan estructura amorfa.

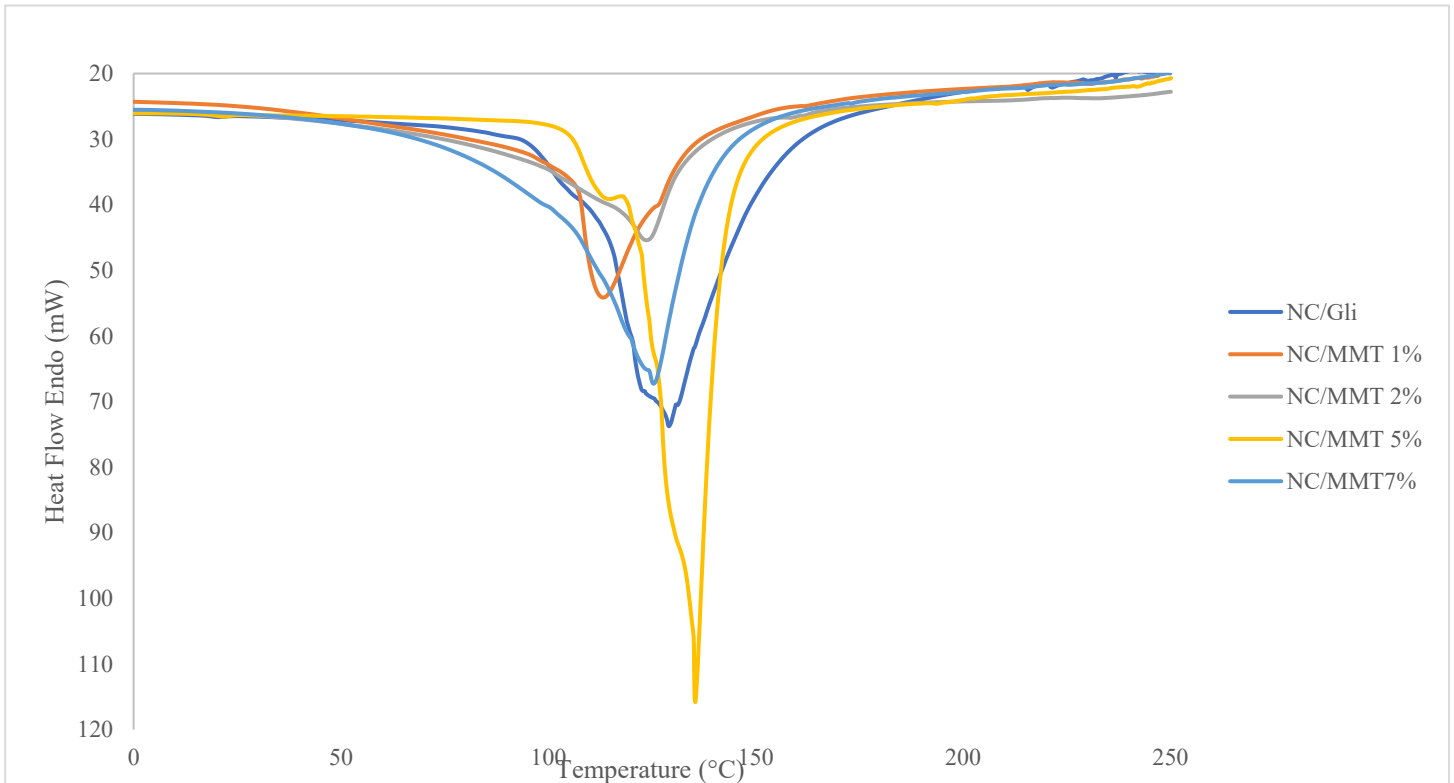


Figura 37. Curvas DSC de los films de NC/Gli y NC/MMT al 1%, 2%, 5% y 7%.

3.5 Análisis Termogravimétrico (TGA)

La estabilidad térmica de los films fue estudiada usando TGA (Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 y Figura 42). En el rango de temperaturas analizado se pudo observar tres zonas de degradación térmica para todos los films. La primera zona de degradación se da en el rango de temperaturas de 30-190 °C con una pérdida de peso de alrededor 13%. Esta se relaciona a la pérdida de agua en la muestra (S. R. et al., 2023).

La segunda zona de degradación está ubicada entre los 190°C y 350°C y presenta una pérdida de masa de 44.37%, 43.66%, 36.74 %, 33.29% y 32.11% para los films NC/Gli, NC/MMT 1, 2, 5 y 7%, respectivamente. Las pérdidas en esta zona se deben a la degradación del exopolisacárido y de enlaces tales como los C-O y C-C (G.-G. Chen et al., 2015; Hussein et al., 2015; S. Rodriguez et al., 2017) además de la pérdida del glicerol

(P. Kumar et al., 2010c). La tercera zona de degradación de los films va desde los 350°C hasta los 600°C con una masa residual resultante de 8.23%, 10.75%, 9.39%, 8.03% y 7.40% para los films indicados según el orden anterior. Estas pérdidas están asociadas a la degradación oxidativa que conduce a un proceso de carbonización (Zamora et al., 2002). Comportamientos de degradación similares han sido reportados para otros exopolisacáridos derivados de cianobacterias como *N. carneum* y *N. sphaericum* (Parikh & Madamwar, 2006).

Se puede observar de manera clara que en los bionanocompuestos con MMT el mecanismo de degradación es de cierta manera diferente comparado al film con solo glicerol. La disminución en las pérdidas de peso de las segundas zonas de degradación indica posibles cambios en la dinámica del movimiento molecular al insertarse MMT (Leszczynska & Pielichowski, 2008). Además, se puede observar un retraso notorio en las pérdidas de peso a temperaturas mayores de 450°C ubicadas en la tercera zona de degradación. Esto se puede atribuir a la estructura multicapa del silicato carbonoso formado por los bionanocompuestos que pueden mantener dicha estructura en la matriz biopolimérica hasta temperaturas de 600°C (S. Wang et al., 2002). El silicato carbonoso se acumula en la superficie mientras aumenta estas temperaturas y genera un aislamiento al material que se encuentra debajo de él ocasionando un escape más lento de los productos volátiles que se generan durante la descomposición (G. Chen et al., 2001). La selección de la temperatura a un 50% de la pérdida de peso indica que este valor para las cantidades de MMT de 5% y 7 %, presenta un incremento de 315°C (film base) a 405°C y 395°C, respectivamente. La mejora de estabilidad térmica a altas cantidades de MMT en estos casos puede deberse también a la estructura en forma de plaquetas que dificultan la descomposición de los productos volátiles ya mencionados, lo cual genera una velocidad de difusión reducida. Otras razones posibles podrían ser la reducción de la

movilidad de las cadenas biopoliméricas que se producen por la inserción de montmorillonita y su comportamiento como aislante térmico (S. F. Wang et al., 2005).

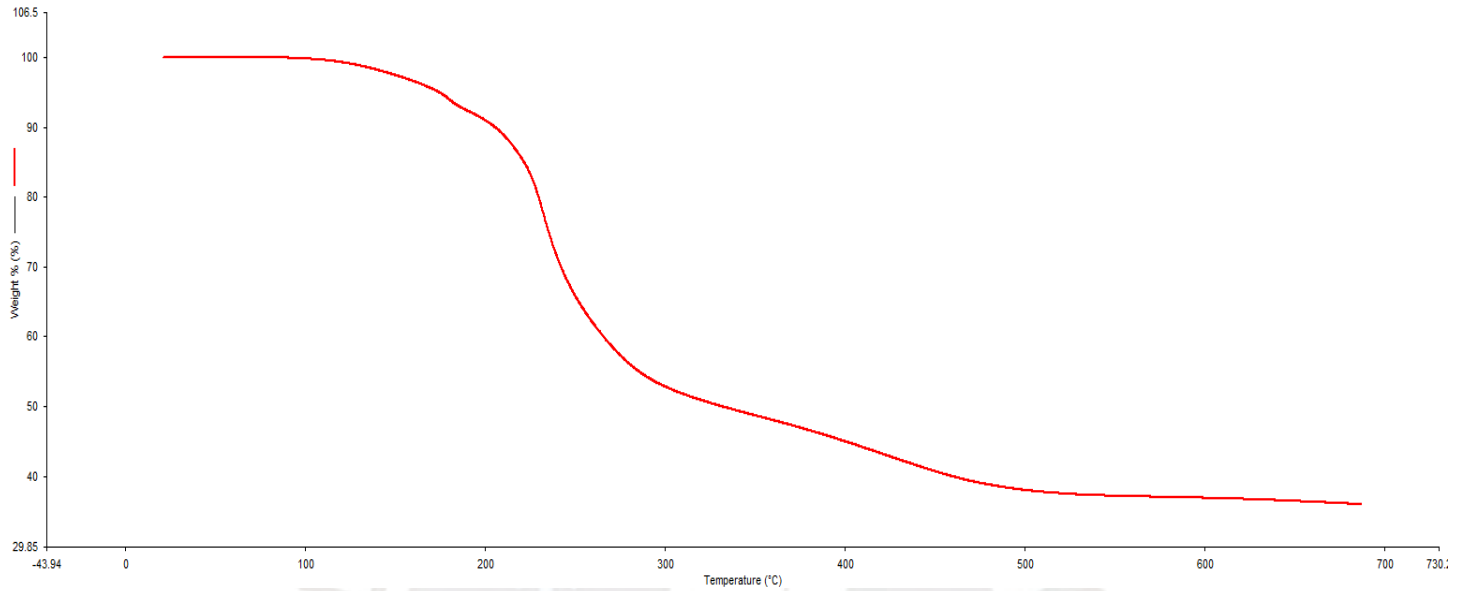


Figura 38. Termograma representativo TGA del film de NC/Gli.

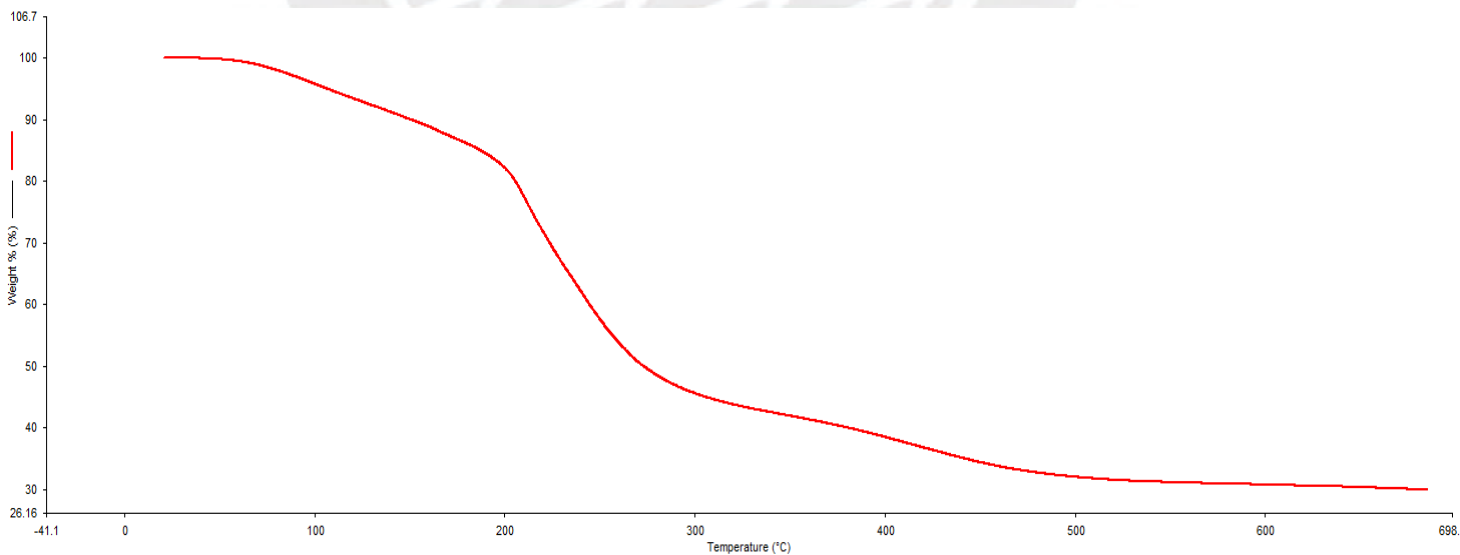


Figura 39. Termograma representativo TGA del film NC/MMT 1%.

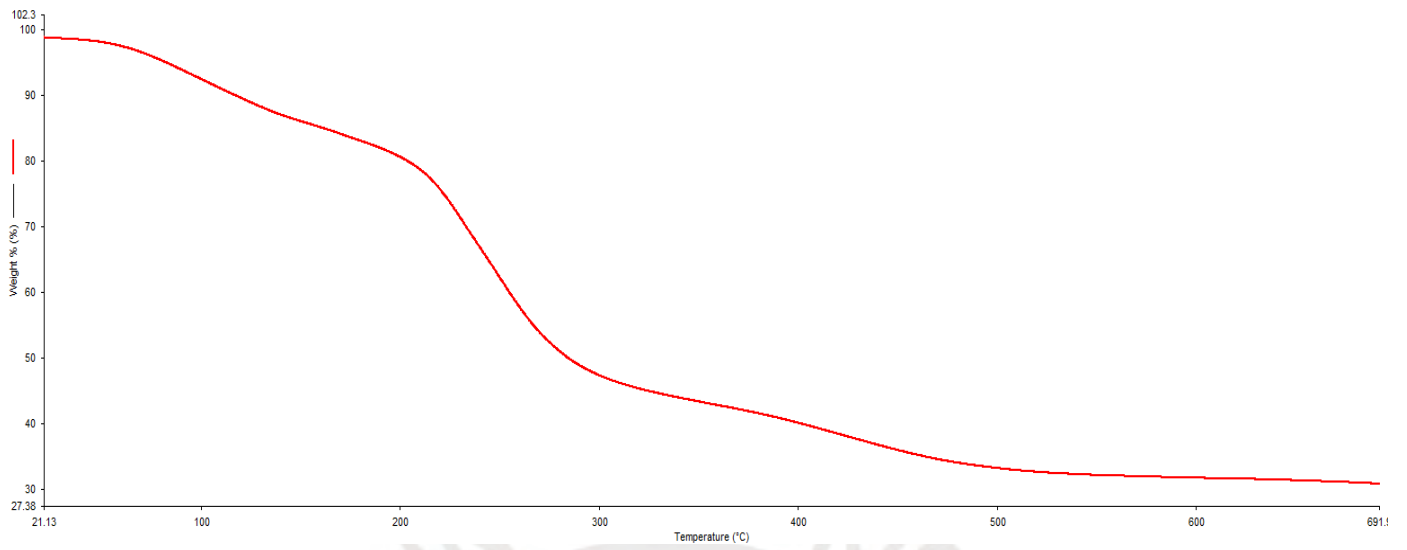


Figura 40. Termograma representativo del film NC/MMT 2%.

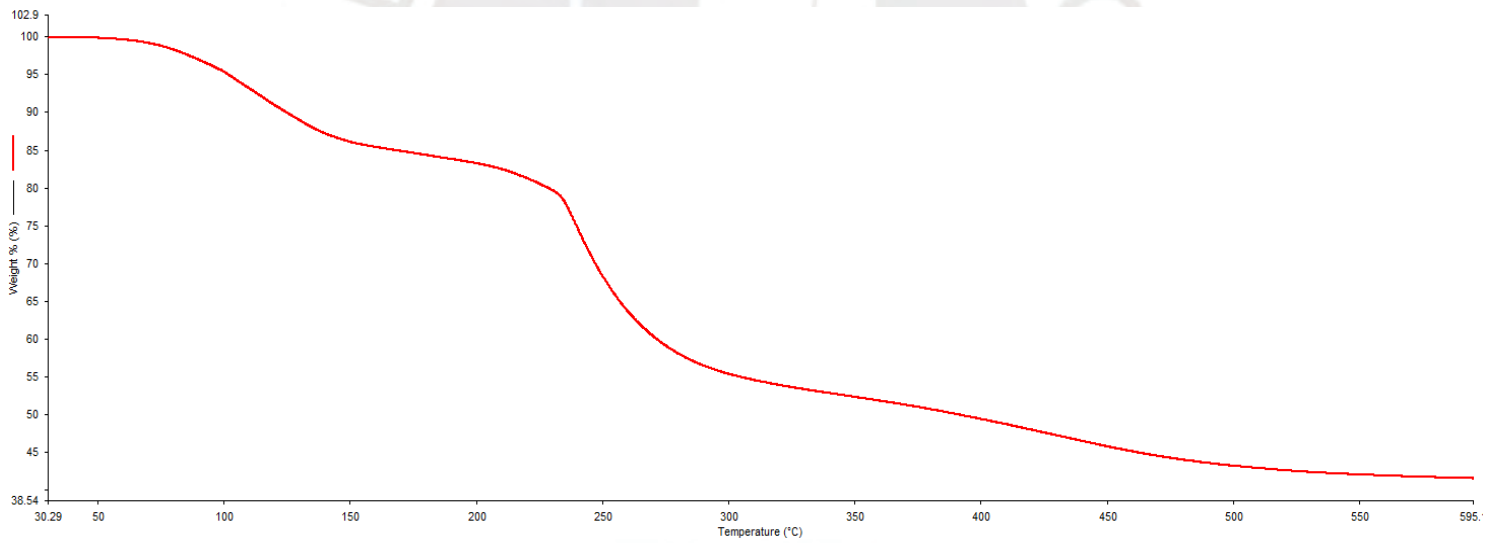


Figura 41. Termograma representativo del film NC/MMT 5%.

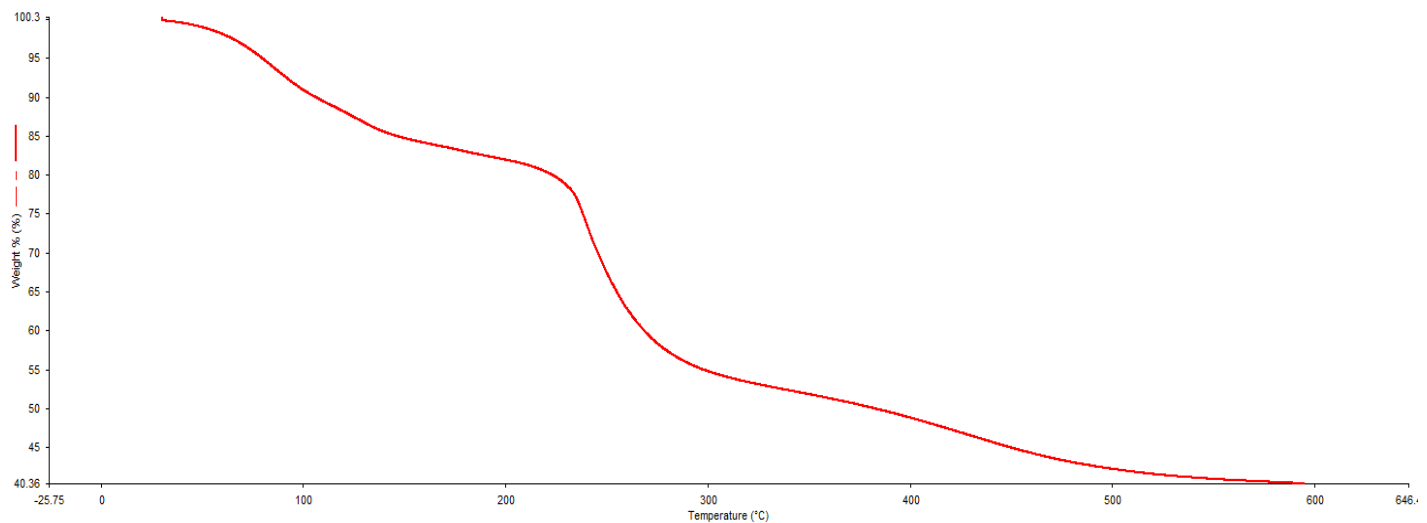


Figura 42. Termograma representativo del film NC/MMT 7%.

3.6 Caracterización morfológica: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Las imágenes SEM de los films de *N. commune* con glicerol y bionanocompuestos se pueden observar en la Figura 43 y Figura 44, respectivamente. El film de *N. commune* con glicerol muestra una superficie casi homogénea la cual autores como S. Rodriguez et al. (2017) explican que esto es indicador de que es soluble y forma una fase uniforme. Las hebras blancas en las imágenes SEM de la Figura 44 corresponden a las plaquetas de MMT. La inserción de esta nanoarcilla hace que se produzca en los bionanocompuestos un aumento de la rugosidad de la superficie, perdiendo la uniformidad de los films comparados al solo preparado con glicerol. Este comportamiento es parecido a lo reportado por autores como Rhim (2011) & P. Kumar et al. (2010c). Esto se debe probablemente por las aglomeraciones que se forman y provocan una reducción de homogeneidad en las estructuras (Coronado Jorge et al., 2015). Dichas aglomeraciones se observan con mayor notoriedad en las cantidades más altas de nanorefuerzo y no son inusuales debido a que su dispersión en el biopolímero se vuelve más difícil incluso con métodos distintos a la sonicación (Savas & Hancer, 2015; Ataefard & Moradian, 2011).

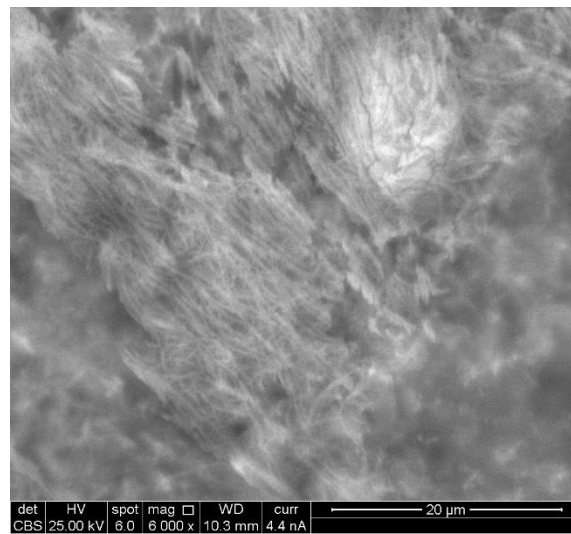


Figura 43. Imagen SEM del film NC/Gli.

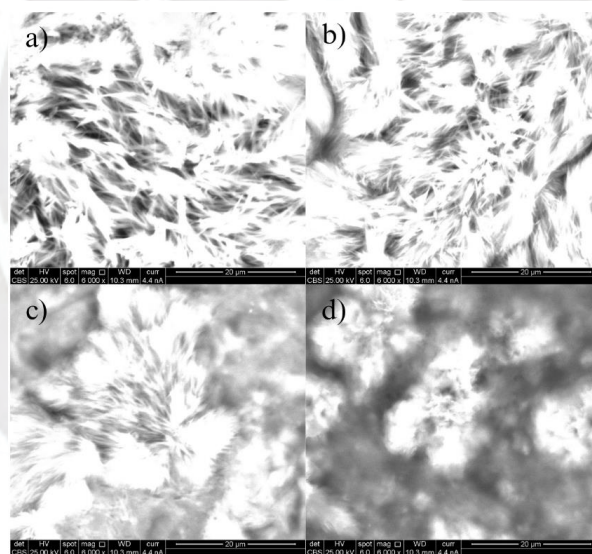


Figura 44. Imágenes SEM de los bionanocompuestos NC/MMT con cantidades de MMT de (a) 1% (b) 2% (c) 5% y (d) 7%.

3.7 Caracterizaciones Mecánicas

Para las caracterizaciones mecánicas se realizaron los ensayos a tracción colocando cada muestra entre las mordazas de la máquina (Figura 45). Con los parámetros previamente

especificados se procedió a realizar los ensayos en cada muestra según la norma correspondiente. La máquina de ensayo aplicó una fuerza que empezó desde los 0 N, y aumentó progresivamente la fuerza en 0.05 N hasta llegar a la rotura de la probeta.



Figura 45. Muestra de NC/MMT sometida a tracción.

Los cálculos de elongación (ϵ) y esfuerzo (σ) se realizaron a partir de los datos de cada lectura brindado por el software MESUR™ Lite de carga en el tiempo en cada ensayo de la siguiente manera:

Elongación (ϵ): La deformación es la variación de longitud respecto a la longitud inicial.

Se calcula:

$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

Simplificando:

$$\epsilon = \frac{(L_0 + v * t) - L_0}{L_0} = \frac{v \left[\frac{mm}{min} \right] * t [s]}{L_0 [mm]}$$

$$\varepsilon = \frac{v * t}{L_0 * 60} \quad \dots (1)$$

Donde:

ε = Elongación.

L_f = Longitud final de la probeta.

L_0 = Longitud inicial de la probeta.

v = velocidad en mm/min.

t = tiempo.

El esfuerzo (σ) se halla como la fuerza sobre el área:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots (2)$$

Donde:

σ = esfuerzo.

F = fuerza en N.

A = área (mm²) = ancho x espesor promedio.

Se tiene, por ejemplo, para un ensayo realizado para una muestra de *N.commune* con glicerol el siguiente procedimiento de cálculo.

Para una lectura aleatoria durante el tiempo de ensayo se obtuvo los siguientes datos de lectura del software MESUR™ Lite:

$$F = 0.25 \text{ N}$$

$$t = 18 \text{ s}$$

Se sabe:

$$L_0 = 60 \text{ mm}$$

$$v = 10 \text{ mm/min}$$

$$\text{ancho} = 5 \text{ mm}$$

En (1):

$$\varepsilon = 0.05$$

Además, se realizó las mediciones de los espesores y se calculó el espesor promedio para esta muestra, indicados en la Tabla 7 :

Tabla 7

Espesor promedio de film NC/glicerol

Medición	Espesor (mm)
e ₁	0.06
e ₂	0.066
e ₃	0.066
e _{prom}	0.064

Se calculó el área involucrada en el esfuerzo a tracción como espesor promedio por el ancho de la muestra.

En (2):

$$\sigma = 0.7813 \text{ MPa}$$

De esta manera se calculó para todas las lecturas en cada muestra los σ y ε correspondientes.

Para el cálculo del módulo elástico, (E) la norma ASTM D882-12 establece que este se realice dibujando una tangente a la porción linear inicial de la curva σ vs. ε y

seleccionando cualquier punto sobre esta tangente, para luego dividir el esfuerzo sobre su elongación correspondiente.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

La Tabla 8 muestra el resumen de los resultados de los ensayos a tracción realizados a los films elaborados a partir de *N. commune*.

Tabla 8

Resultados de ensayos a tracción de los films.

Muestra	Módulo Elástico (Mpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación máxima (%)
NC/Gli	6.38 ± 1.26	1.49 ± 0.14	60.67 ± 7.54
NC/MMT 1%	7.17 ± 1.05	1.67 ± 0.22	42.14 ± 9.49
NC/MMT 2%	11.92 ± 3.12	2.09 ± 0.45	48.42 ± 8.43
NC/MMT 5%	20.02 ± 5.26	2.24 ± 0.10	32.97 ± 8.56
NC/MMT 7%	19.25 ± 2.69	2.16 ± 0.67	33.11 ± 15.01

En dicha tabla se puede apreciar que para el caso del film hecho con *N. commune* y glicerol se logró un módulo elástico de 6.38 MPa, resistencia a la tracción de 1.49 MPa y una elongación máxima de 60.67%. Al empezar a añadir MMT y crear nuevos bionanocompuestos se observó como empezaron a modificarse las propiedades mecánicas. En el film de NC/MMT 1% se produjo un módulo elástico de 7.17 MPa, representando un incremento de 12.38% respecto al film base con solo glicerol. La resistencia a la tracción fue de 1.67 MPa, lo que significó un aumento de 12.08%. La elongación máxima presentada fue 42.14%, decreciendo un 30.54%. Para el film con NC/MMT 2% se observó que el módulo elástico logró aumentar hasta 11.92 MPa lo que se tradujo en un aumento de 86.83%. Asimismo, la resistencia a la tracción se vio mejorada pues se logra acrecentar hasta 2.09 MPa, lo que es un incremento de 40.27%.

Por último, la elongación máxima fue de 48.42%, viéndose una reducción del 20.19%. En el caso del film de NC/MMT 5% se observan también aún el aumento de propiedades mecánicas: se obtuvo un módulo elástico de 20.02 MPa, lo que significó un aumento de 213.79%, y una resistencia a la tracción de 2.24 MPa, que representó un incremento de 50.33%. La elongación máxima de este film fue de 32.97%, decreciendo un 45.66%. Por último, el film de NC/MMT 7% presentó un módulo elástico de 19.25 MPa, una resistencia a la tracción de 2.16 MPa y una elongación máxima de 33.11%, los cuales representaron un aumento de 201.72% y 44.97% para estos dos primeros y un decremento de 45.42% para la elongación respecto al film original. Sin embargo, a partir de esta cantidad de MMT se observa que empiezan a reducirse los valores de las propiedades de módulo elástico y resistencia a la tracción.

En general, se observó que al ir añadiendo las diferentes cantidades de MMT del 1 al 5%, las propiedades mecánicas empezaron a incrementar, donde los mejores valores de módulo de elasticidad y resistencia a la tracción exhibidos fueron cuando la concentración de MMT fue de 5%. El aumento de estas propiedades mecánicas se debe a las interacciones superficiales mejoradas entre el biopolímero y la MMT las cuales tienen una alta área superficial debido a su estructura 2:1 (Flaker et al., 2015). Además, la formación de enlaces de hidrógeno que se generan debido a estas interacciones también contribuye a la mejora de estas propiedades (Lee & Kim, 2010; Rhim, 2011). La reducción de la elongación de los bionanocompuestos al agregarse la MMT es producto del aumento de rigidez. Se ha reportado el aumento de propiedades mecánicas debido a la inserción de nanoarcilla en diferentes cantidades en otros biopolímeros como la proteína de soya (Lee & Kim, 2010; P. Kumar et al., 2010b), almidón (Cyras et al., 2008; M. Huang et al., 2006), quitosano (Casariego et al., 2009), gelatina (Flaker et al., 2015; Coronado Jorge et al., 2015) y alginato (Alboofetileh et al., 2013).

Las propiedades mecánicas se empiezan a reducir cuando se aumenta la cantidad de MMT al 7%. Este decrecimiento a una alta cantidad de MMT se debe probablemente a la formación de aglomeraciones parciales o una incompleta dispersión sobre el biopolímero que reducen el efecto de refuerzo de la nanoarcilla (Rhim, 2011; Alboofetileh et al., 2013).

Dado que los films ensayados en esta tesis son hechos de un nuevo material, no existe información disponible en la literatura para una posible comparación de sus propiedades mecánicas. Asimismo, no es factible comparar los resultados de este ensayo con los de otros biopolímeros debido a la diversidad de factores que pueden afectar los resultados de cada ensayo, tales como las diferentes condiciones de ensayo, una composición diferente del exopolisacárido, un método distinto para la preparación de los films, entre otros. Sin embargo, valores similares del módulo elástico, resistencia a la tracción y elongación máxima han sido encontrados en las caracterizaciones mecánicas realizadas a films hechos de ciertos biopolímeros incluyendo algunos exopolisacáridos como se ve en la Tabla 9. Estos films han sido reportados en las investigaciones con potenciales usos en la industria alimentaria y biomédica. De esta manera, se confirma que el bionanocompuesto de *N. commune* y montmorillonita es un material factible para la realización de films.



Tabla 9

Valores de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y elongación máxima de films hechos con biopolímeros.

Film	Resistencia a la Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Elongación máxima (%)	Referencia
Film de almidón con harina de lentejas	2.1-6.3	0.86-4.8	42-149	Ochoa-Yepes et al. (2018)
Film de almidón de quinua	7.56	4.59	58.14	Araujo-Farro et al. (2010)
Film de almidón de yuca	1.88	13.9	19	Gutiérrez et al. (2015)
Film de EPS extraído de alteromonas	4.55	10	47	Concórdio-Reis et al. (2022)
Film de EPS Enterobacter E47	3.1	2.8	54.9	Ferreira et al. (2014)
Films de gellan	0.8-2.0	1.0-3.0	3.0-9.0	León et al. (2009)

Las gráficas representativas de Esfuerzo vs. Deformación unitaria para los films de NC/Glicerol y NC/MMT 1%, 2%, 5%, 7% se pueden observar en la Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49 y Figura 50 respectivamente.

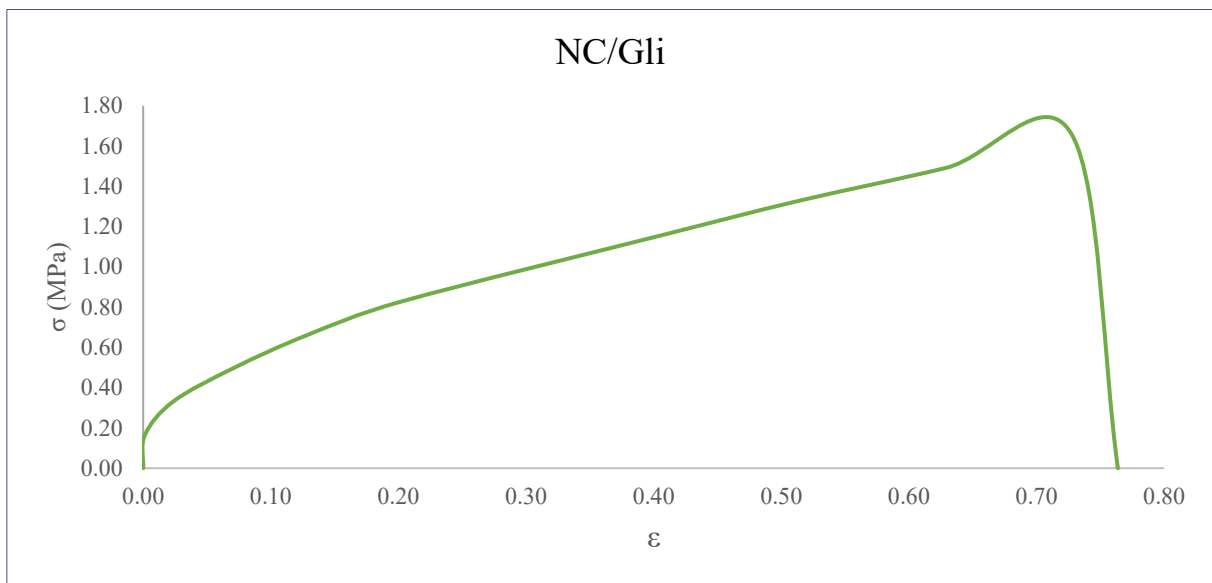


Figura 46. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/Gli.

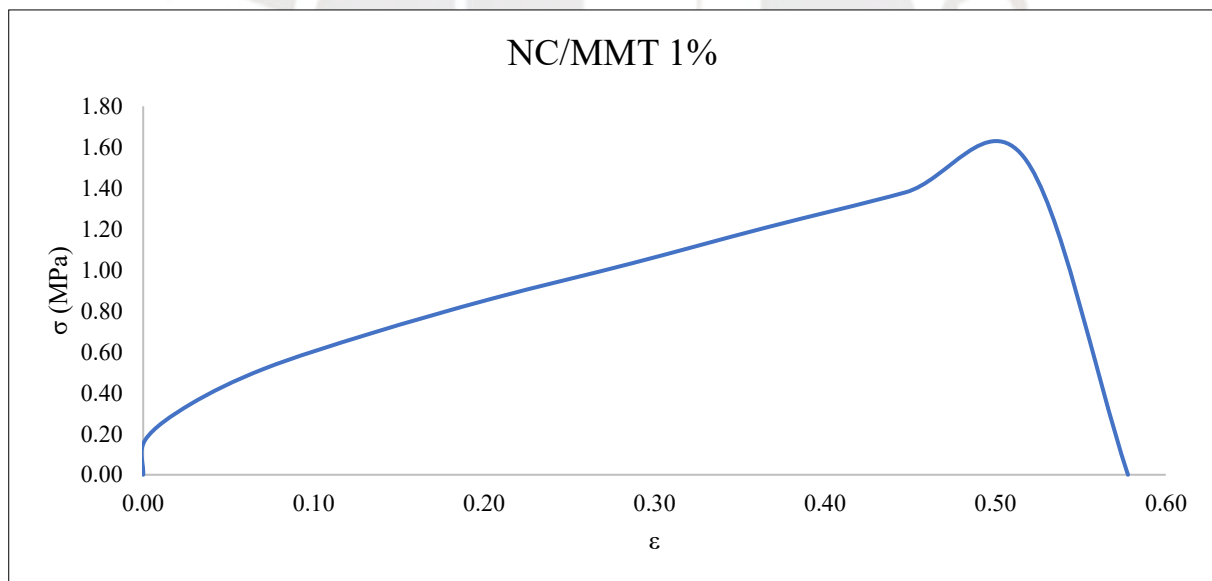


Figura 47. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 1%.

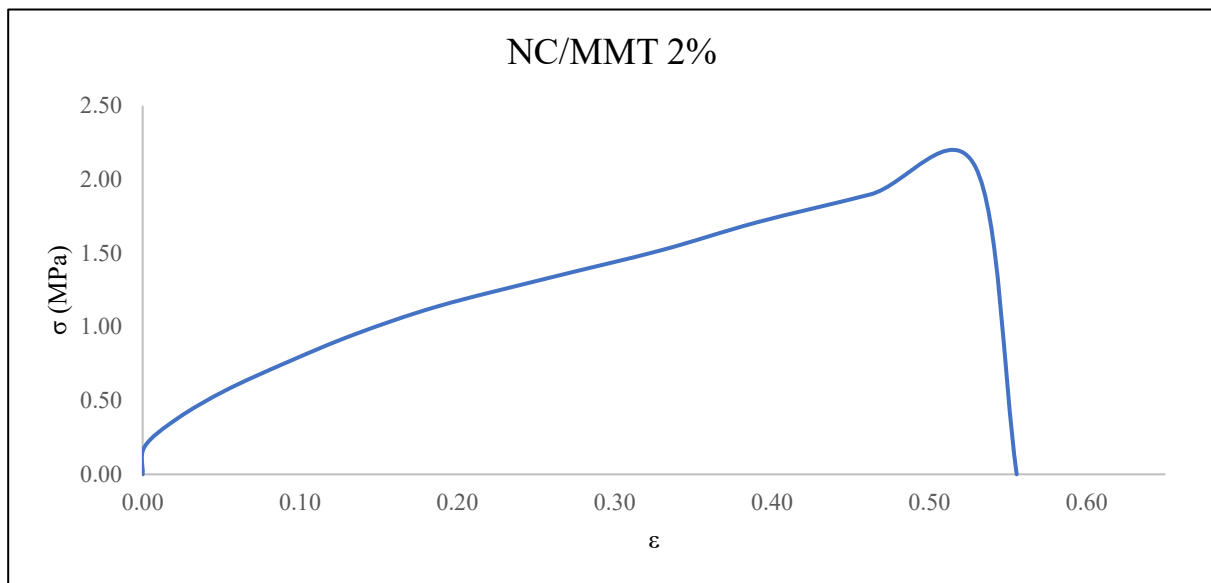


Figura 48. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 2%.

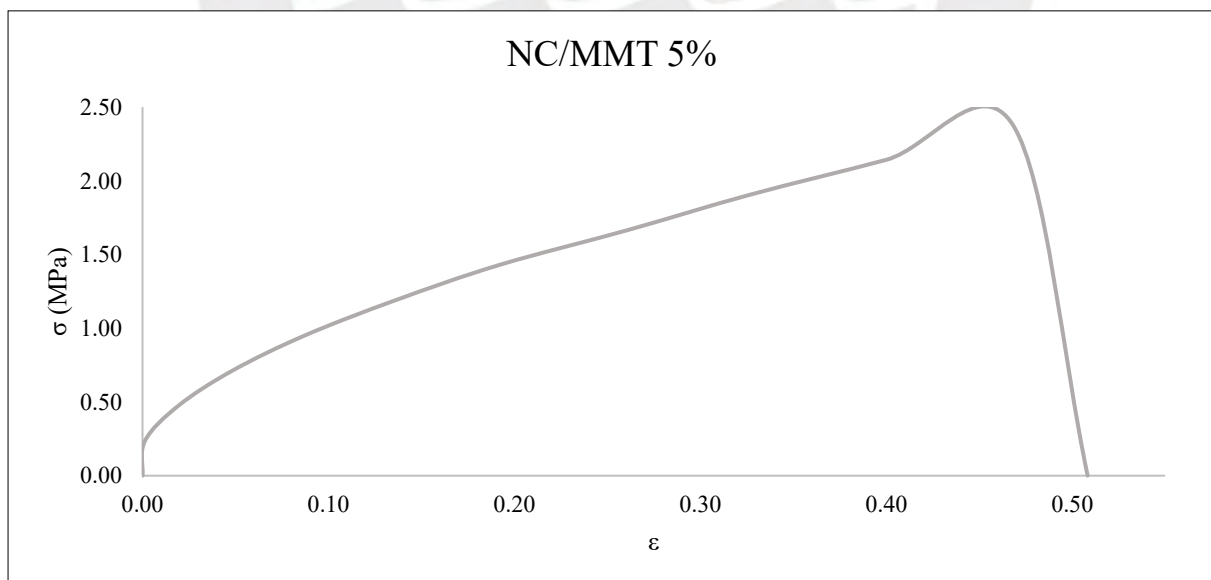


Figura 49. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 5%.

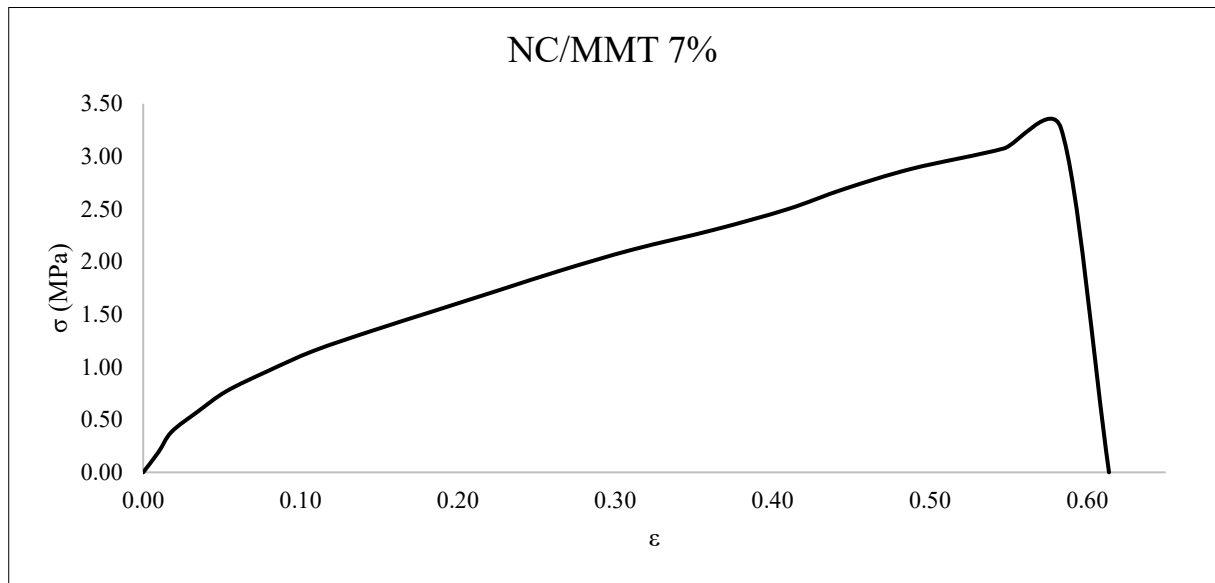


Figura 50. Gráfica representativa esfuerzo – deformación unitaria del film de NC/MMT 7%.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró la fabricación de films a partir de bionanocompuestos cuya matriz es el exopolisacárido extraído de *Nostoc commune* y distintas cantidades de montmorillonita como nanorefuerzos, acompañado de glicerol como plastificante para reducir la fragilidad del film.

Se realizó la extracción de exopolisacáridos derivados de la cianobacteria *Nostoc commune* siguiendo un método en medio acuoso de NaOH. El rendimiento de esta extracción es de 34.53%, valor que se encuentra dentro del rango promedio según lo reportado en la literatura.

Además, se describió el proceso de manufactura de los films de estos bionanocompuestos, partiendo de la base de preparación de films realizados a partir de *N. commune* con glicerol. A partir de ello, se realizó la inserción de nanorefuerzos mediante un método de goteo a alta velocidad que logró la dispersión del nanorefuerzo sobre la matriz. De esta manera, se obtuvieron films de buena apariencia y de fácil manipulación para los ensayos de caracterización realizados.

Con los films fabricados se realizaron las caracterizaciones mecánicas, térmicas, fisicoquímicas y morfológicas. La caracterización de DLS permitió observar un tamaño promedio de la MMT de 418 nm. Este valor está asociado a su dimensión lateral y coincide con la literatura por su estructura en capas 2:1 según su ordenamiento atómico (dos capas tetraédricas y una octaédrica) y también por la naturaleza de su fuente y preparación. Es el valor alto de esta dimensión y su espesor de alrededor 1 nm que da una elevada relación de aspecto que son características de la MMT.

La caracterización de FTIR-ATR permitió conocer la posible estructura de los bionanocompuestos, los cuales son similares al film realizado de solo *N. commune* con glicerol. Esta estructura está posiblemente compuesta de grupos hidroxilos, polifenoles, carboxilos, hidrocarburos y unidades de glucosa. Esta caracterización también permitió reconocer un aumento de grupos OH al aumentar las cantidades de MMT, lo cual puede ser un indicador de la influencia que tiene esta nanoarcilla sobre el bionanocompuesto para aceptar moléculas de agua, mejorando su solubilidad. La presencia de oxígeno en la

estructura y grupos hidroxilos de los films hace que posean una actividad antioxidante debido a la alta actividad de los radicales de los hidroxilos.

Los ensayos térmicos de análisis TGA demostraron que la degradación de los films en un rango de temperaturas. Se identificaron tres zonas de degradación. La primera zona (30-190°C) está atribuido a la pérdida de agua en todos los films. La pérdida de peso en la segunda zona (190-350°C) se debe a la degradación del exopolisacárido y volatilización del glicerol. En la tercera zona (350-600°C) las pérdidas se atribuyen al proceso de carbonización. Además, a temperaturas mayores de 450°C se observa una pérdida de peso más lenta, debido posiblemente a la estructura multicapas del silicato carbonoso generado que hace más difícil el escape de productos generados durante la descomposición al acumularse este silicato carbonoso encima de la superficie. Esta estructura puede mantenerse hasta temperaturas de 600°C. Para un 50% de pérdida de peso, los films NC/MMT 5 y 7% tienen una mejor estabilidad térmica al presentar un incremento de temperatura de 315°C (film base) a 405°C y 395°C, respectivamente. Las razones de esta mejora se deben a la estructura en forma de plaquetas de la MMT que reduce la velocidad de difusión al impedir la descomposición de productos volátiles fuera del bionanocompuesto, la reducción del movimiento de las cadenas biopoliméricas al interactuar con la MMT y el comportamiento de aislamiento térmico que este presenta.

Por otro lado, la caracterización térmica de DSC a los films mostró un solo pico endotérmico en el rango de 113°C-135°C. La presencia de este pico está relacionado a procesos térmicos como la deshidratación y evaporación de la humedad en el material. La adición de MMT no presenta una afectación a las propiedades térmicas en el rango de temperaturas evaluado al observarse los picos endotérmicos con temperaturas muy cercanas. Este comportamiento es similar a lo reportado en la literatura de bionanocompuestos con MMT.

Las caracterizaciones morfológicas realizadas a través de la microscopía electrónica de barrido permitieron conocer la morfología de los films. Los films de *N. commune* con glicerol mostraron una superficie casi homogénea que indica que es soluble y forma una fase uniforme. Para el caso de los bionanocompuestos, la adición de la MMT representó un aumento de la rugosidad, perdiendo la uniformidad que tenían los films base. Esto es causado por la formación de aglomeraciones que provocan la reducción de homogeneidad

en las estructuras. Las cantidades más altas de MMT (5% y 7%) son las que presentan una mayor cantidad de aglomeraciones.

Las caracterizaciones mecánicas realizadas a los bionanocompuestos demostraron una notoria influencia en las propiedades mecánicas de los films. La inserción de MMT en los films hizo que se obtuviera un material más rígido, esto debido al aumento del módulo de elasticidad de los films con esta nanoarcilla al 1%, 2%, 5% y 7% con valores de 7.17, 11.92, 20.02 y 19.25 MPa, respectivamente. Es decir, un aumento de 12.38%, 86.83%, 213.79% y 201.72% en comparación al film base. La resistencia a la tracción también presentó un aumento, con valores de 1.67, 2.09, 2.24 y 2.16 MPa para dichas cantidades de MMT, los cuales representan un incremento de 12.08%, 40.27%, 50.33% y 44.97% respecto al film base. La elongación máxima se vio reducida en los bionanocompuestos como consecuencia del aumento de rigidez del film. Las mejores propiedades mecánicas se obtienen en el film NC/MMT 5%. La mejora de estas propiedades mecánicas se debe a las interacciones superficiales mejoradas entre el biopolímero y la nanoarcilla por su alta área superficial debido a su estructura 2:1. La formación de enlaces de hidrógeno generadas por dichas interacciones también ayudan a la mejora de estas propiedades. La reducción de las propiedades mecánicas al incrementarse la cantidad de MMT al 7% se atribuye a la formación de aglomeraciones parciales y una incompleta dispersión que reducen el efecto de refuerzo.

Finalmente, se puede concluir basado en los resultados de la presente tesis que se pueden generar films estables hechos con bionanocompuestos de *N. commune* y montmorillonita. La actividad antioxidante, capacidad de retención a la humedad y mejora en estabilidad térmica debido a su estructura, además de la capacidad de poder fabricar films a través de un método simple permite que estos tengan potenciales usos en aplicaciones biomédicas como membranas, recubrimientos u otros tipos de materiales. Asimismo, los valores obtenidos en las caracterizaciones mecánicas son similares a films hechos de exopolisacáridos con usos en biomedicina según lo reportado por otros autores en la literatura.

Con el fin de seguir mejorando y avanzando en el estudio de los bionanocompuestos de *N. commune* y montmorillonita; se recomienda estudiar la distribución de la montmorillonita sobre la matriz de *N. commune* a través de métodos como la microscopía

electrónica con criofractura o estudios de propiedades localizadas. Por otro lado, se podría explorar su campo de uso como en la industria alimentaria con estudios a la permeabilidad del agua o gases, además de la solubilidad de los films en agua.



BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, M. H., Bashir, N., Ahmad, H., Abd Jamil, A. A., & Suleiman, A. A. (2014). An Overview of Electrical Tree Growth in Solid Insulating Material with Emphasis of Influencing Factors, Mathematical Models and Tree Suppression. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 12(8). <https://doi.org/10.11591/telkomnika.v12i8.5556>
- Alboofetileh, M., Rezaei, M., Hosseini, H., & Abdollahi, M. (2013). Effect of montmorillonite clay and biopolymer concentration on the physical and mechanical properties of alginate nanocomposite films. *Journal of Food Engineering*, 117(1), 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.042>
- Alexandre, M., & Dubois, P. (2000). Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 28(1–2), 1–63. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(00\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00012-7)
- Alvarez, X., Alves, A., Ribeiro, M. P., Lazzari, M., Coutinho, P., & Otero, A. (2021). Biochemical characterization of *Nostoc* sp. exopolysaccharides and evaluation of potential use in wound healing. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117303. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117303>
- Ansari, S., & Fatma, T. (2016). Cyanobacterial Polyhydroxybutyrate (PHB): Screening, Optimization and Characterization. *PLOS ONE*, 11(6), e0158168. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158168>
- Araujo-Farro, P. C., Podadera, G., Sobral, P. J. A., & Menegalli, F. C. (2010). Development of films based on quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willdenow) starch. *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 839–848. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.051>
- Arrieta, M. P., Peponi, L., López, D., López, J., & Kenny, J. M. (2017). An overview of nanoparticles role in the improvement of barrier properties of bioplastics for food packaging applications. In *Food Packaging* (pp. 391–424). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804302-8.00012-1>

- Ataefard, M., & Moradian, S. (2011). Surface properties of polypropylene/organoclay nanocomposites. *Applied Surface Science*, 257(6), 2320–2326. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.09.096>
- Bahnamiri, P. J., Hajizadeh Moghaddam, A., Ranjbar, M., & Nazifi, E. (2024). Effects of *Nostoc commune* extract on the cerebral oxidative and neuroinflammatory status in a mice model of schizophrenia. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 37, 101594. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2023.101594>
- Bai, Y., Ho, S., & Kotov, N. A. (2012). Direct-write maskless lithography of LBL nanocomposite films and its prospects for MEMS technologies. *Nanoscale*, 4(15), 4393. <https://doi.org/10.1039/c2nr30197k>
- Bajpai, A. K., Goswami, A., Bajpai, J., & Sinha, B. K. (2018). Study of Mechanical, Optical, and Electrical Behaviors of Calcium Alginate/Poly(vinyl alcohol)–Vanadium Pentoxide Bionanocomposite Films. *Macromolecular Research*, 26(4), 305–316. <https://doi.org/10.1007/s13233-018-6040-0>
- Berean, K. J., Ou, J. Z., Nour, M., Field, M. R., Alsaif, M. M. Y. A., Wang, Y., Ramanathan, R., Bansal, V., Kentish, S., Doherty, C. M., Hill, A. J., McSweeney, C., Kaner, R. B., & Kalantar-zadeh, K. (2015). Enhanced Gas Permeation through Graphene Nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(24), 13700–13712. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b02995>
- Bitinis, N., Hernandez, M., Verdejo, R., Kenny, J. M., & Lopez-Manchado, M. A. (2011). Recent Advances in Clay/Polymer Nanocomposites. *Advanced Materials*, 23(44), 5229–5236. <https://doi.org/10.1002/adma.201101948>
- Bomeni, I. Y., Njoya, A., Ngapgue, F., Wouatong, A. S. L., Yongue Fouateu, R., Kamgang Kabeyene, V., & Fagel, N. (2018). Ceramic with potential application of ngwenfon alluvial clays (noun, west cameroon) in building construction: Mineralogy, physicochemical composition and thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 182, 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.135>
- Bouvree, A., Feller, J.-F., Castro, M., Grohens, Y., & Rinaudo, M. (2009). Conductive Polymer nano-bioComposites (CPC): Chitosan-carbon nanoparticle a good

- candidate to design polar vapour sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *138*(1), 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.02.022>
- Brüll, L. P., Huang, Z., Thomas-Oates, J. E., Paulsen, B. S., Cohen, E. H., & Michaelsen, T. E. (2000). STUDIES OF POLYSACCHARIDES FROM THREE EDIBLE SPECIES OF *NOSTOC* (CYANOBACTERIA) WITH DIFFERENT COLONY MORPHOLOGIES: STRUCTURAL CHARACTERIZATION AND EFFECT ON THE COMPLEMENT SYSTEM OF POLYSACCHARIDES FROM *NOSTOC COMMUNE*. *Journal of Phycology*, *36*(5), 871–881. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.00038.x>
- Calambas, H. L., Fonseca, A., Adames, D., Aguirre-Loredo, Y., & Caicedo, C. (2021). Physical-Mechanical Behavior and Water-Barrier Properties of Biopolymers-Clay Nanocomposites. *Molecules*, *26*(21), 6734. <https://doi.org/10.3390/molecules26216734>
- Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G., & Wypych, F. (2009). Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. *Materials Research*, *12*(1), 1–39. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000100002>
- Casariello, A., Souza, B. W. S., Cerqueira, M. A., Teixeira, J. A., Cruz, L., Díaz, R., & Vicente, A. A. (2009). Chitosan/clay films' properties as affected by biopolymer and clay micro/nanoparticles' concentrations. *Food Hydrocolloids*, *23*(7), 1895–1902. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.02.007>
- Ccorahua, R., Troncoso, O. P., Rodriguez, S., Lopez, D., & Torres, F. G. (2017). Hydrazine treatment improves conductivity of bacterial cellulose/graphene nanocomposites obtained by a novel processing method. *Carbohydrate Polymers*, *171*, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.005>
- Cerqueira, M. A., Souza, B. W. S., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2012). Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films – A comparative study. *Food Hydrocolloids*, *27*(1), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.07.007>

- Cheirmadurai, K., Biswas, S., Murali, R., & Thanikaivelan, P. (2014). Green synthesis of copper nanoparticles and conducting nanobiocomposites using plant and animal sources. *RSC Advances*, 4(37), 19507. <https://doi.org/10.1039/c4ra01414f>
- Chen, G., Liu, S., Chen, S., & Qi, Z. (2001). FTIR Spectra, Thermal Properties, and Dispersibility of a Polystyrene/Montmorillonite Nanocomposite. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 202(7), 1189–1193. [https://doi.org/10.1002/1521-3935\(20010401\)202:7<1189::AID-MACP1189>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1521-3935(20010401)202:7<1189::AID-MACP1189>3.0.CO;2-M)
- Chen, G.-G., Qi, X.-M., Li, M.-P., Guan, Y., Bian, J., Peng, F., Yao, C.-L., & Sun, R.-C. (2015). Hemicelluloses/montmorillonite hybrid films with improved mechanical and barrier properties. *Scientific Reports*, 5(1), 16405. <https://doi.org/10.1038/srep16405>
- Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Ligarda-Samanez, C. A., Peralta-Guevara, D. E., Solano-Reynoso, A. M., Ramos-Pacheco, B. S., Taipei-Pardo, F., Martínez-Huamán, E. L., Aguirre Landa, J. P., Agreda Cerna, H. W., Loayza-Céspedes, J. C., Zamalloa-Puma, M. M., Álvarez-López, G. J., Zamalloa-Puma, A., Moscoso-Moscoso, E., & Quispe-Quispe, Y. (2022). Effect of the Addition of Corn Husk Cellulose Nanocrystals in the Development of a Novel Edible Film. *Nanomaterials*, 12(19), 3421. <https://doi.org/10.3390/nano12193421>
- Colusso, E., & Martucci, A. (2021). An overview of biopolymer-based nanocomposites for optics and electronics. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(17), 5578–5593. <https://doi.org/10.1039/D1TC00607J>
- Concórdio-Reis, P., Pereira, J. R., Alves, V. D., Nabais, A. R., Neves, L. A., Marques, A. C., Fortunato, E., Moppert, X., Guézennec, J., Reis, M. A. M., & Freitas, F. (2022). Characterisation of Films Based on Exopolysaccharides from *Alteromonas* Strains Isolated from French Polynesia Marine Environments. *Polymers*, 14(20), 4442. <https://doi.org/10.3390/polym14204442>
- Coronado Jorge, M. F., Alexandre, E. M. C., Caicedo Flaker, C. H., Bittante, A. M. Q. B., & Sobral, P. J. do A. (2015). Biodegradable Films Based on Gelatin and Montmorillonite Produced by Spreading. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/806791>

- Corvaglia, S., Rodriguez, S., Bardi, G., Torres, F. G., & Lopez, D. (2016). Chitin whiskers reinforced carrageenan films as low adhesion cell substrates. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 65(11), 574–580. <https://doi.org/10.1080/00914037.2016.1149846>
- Cyras, V. P., Manfredi, L. B., Ton-That, M.-T., & Vázquez, A. (2008). Physical and mechanical properties of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposite films. *Carbohydrate Polymers*, 73(1), 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.11.014>
- Derungs, I., Rico, M., López, J., Barral, L., Montero, B., & Bouza, R. (2021). Influence of the hydrophilicity of montmorillonite on structure and properties of thermoplastic wheat starch/montmorillonite bionanocomposites. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(11), 4479–4489. <https://doi.org/10.1002/pat.5450>
- Ding, C., Yue, C., Su, J., Wang, H., Yang, N., & Cheng, B. (2022). Effects of oxidized cellulose nanocrystals on the structure and mechanical properties of regenerated collagen fibers. *Cellulose*, 29(14), 7677–7690. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04750-z>
- Famá, L. M., Pettarin, V., Goyanes, S. N., & Bernal, C. R. (2011). Starch/multi-walled carbon nanotubes composites with improved mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 83(3), 1226–1231. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.09.027>
- Fernandes, F. M., Ruiz, A. I., Darder, M., Aranda, P., & Ruiz-Hitzky, E. (2009). Gelatin-Clay Bio-Nanocomposites: Structural and Functional Properties as Advanced Materials. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9(1), 221–229. <https://doi.org/10.1166/jnn.2009.J002>
- Ferreira, A. R. V., Torres, C. A. V., Freitas, F., Reis, M. A. M., Alves, V. D., & Coelho, I. M. (2014). Biodegradable films produced from the bacterial polysaccharide FucoPol. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.04.022>
- Flaker, C. H. C., Lourenço, R. V., Bittante, A. M. Q. B., & Sobral, P. J. A. (2015). Gelatin-based nanocomposite films: A study on montmorillonite dispersion methods and

- concentration. *Journal of Food Engineering*, 167, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.11.009>
- Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., & Oleyaei, S. A. (2013). A Novel Modified Starch/Carboxymethyl Cellulose/Montmorillonite Bionanocomposite Film: Structural and Physical Properties. *International Journal of Food Engineering*, 10(1), 121–130. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2012-0197>
- Gopi, K. (2014). Isolation Purification and Screening of Biodegradable Polymer PHB Producing Cyanobacteria from Marine and Fresh Water Resources. *Iranica Journal of Energy and Environment*. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2014.05.01.14>
- Grande, C. J., Torres, F. G., Gomez, C. M., & Carmen Bañó, M. (2009). Nanocomposites of bacterial cellulose/hydroxyapatite for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 5(5), 1605–1615. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.01.022>
- Grande, C. J., Torres, F. G., Gomez, C. M., Troncoso, O. P., Canet-Ferrer, J., & Martínez-Pastor, J. (2009). Development of self-assembled bacterial cellulose–starch nanocomposites. *Materials Science and Engineering: C*, 29(4), 1098–1104. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.09.024>
- Guessasma, S. (2022). *Biopolymer Applications: Biomedical and Industrial*. <https://doi.org/10.4172/bsh.1000114>
- Guidara, M., Yaich, H., Benelhadj, S., Adjouman, Y. D., Richel, A., Blecker, C., Sindic, M., Boufi, S., Attia, H., & Garna, H. (2020). Smart ulvan films responsive to stimuli of plasticizer and extraction condition in physico-chemical, optical, barrier and mechanical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 714–726. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.111>
- Gul, S., Kausar, A., Muhammad, B., & Jabeen, S. (2016). Research Progress on Properties and Applications of Polymer/Clay Nanocomposite. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(7), 684–703. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1098699>
- Gupta, P. K. (2016). Toxicological testing. In *Fundamentals of Toxicology* (pp. 111–122). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805426-0.00010-X>

- Gutiérrez, T. J., Tapia, M. S., Pérez, E., & Famá, L. (2015). Structural and mechanical properties of edible films made from native and modified cush-cush yam and cassava starch. *Food Hydrocolloids*, 45, 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.017>
- Handy, R. D., Clark, N. J., & Vassallo, J. (2023). Nanotechnology for aquaculture and fisheries. In *Nano-Enabled Sustainable and Precision Agriculture* (pp. 215–257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91233-4.00006-5>
- Helm, R. F., Huang, Z., Edwards, D., Leeson, H., Peery, W., & Potts, M. (2000). Structural Characterization of the Released Polysaccharide of Desiccation-Tolerant *Nostoc commune* DRH-1. *Journal of Bacteriology*, 182(4), 974–982. <https://doi.org/10.1128/JB.182.4.974-982.2000>
- Hill, D. R., Keenan, T. W., Helm, R. F., Potts, M., Crowe, L. M., & Crowe, J. H. (1997). Extracellular polysaccharide of *Nostoc commune* (Cyanobacteria) inhibits fusion of membrane vesicles during desiccation. *Journal of Applied Phycology*, 9(3), 237–248. <https://doi.org/10.1023/A:1007965229567>
- Hori, K., Ueno-Mohri, T., Okita, T., & Ishibashi, G. (1990). Chemical composition, in vitro protein digestibility and in vitro available iron of blue green alga, *Nostoc commune*. *Plant Foods for Human Nutrition*, 40(3), 223–229. <https://doi.org/10.1007/BF01104146>
- Huang, M., Yu, J., & Ma, X. (2006). High mechanical performance MMT-urea and formamide-plasticized thermoplastic cornstarch biodegradable nanocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 63(3), 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.09.006>
- Huang, X., & Brittain, W. J. (2001). Synthesis and Characterization of PMMA Nanocomposites by Suspension and Emulsion Polymerization. *Macromolecules*, 34(10), 3255–3260. <https://doi.org/10.1021/ma001670s>
- Huang, Z., Liu, Y., Paulsen, B. S., & Klaveness, D. (1998). STUDIES ON POLYSACCHARIDES FROM THREE EDIBLE SPECIES OF *NOSTOC* (CYANOBACTERIA) WITH DIFFERENT COLONY MORPHOLOGIES: COMPARISON OF MONOSACCHARIDE COMPOSITIONS AND

- VISCOSITIES OF POLYSACCHARIDES FROM FIELD COLONIES AND SUSPENSION CULTURES. *Journal of Phycology*, 34(6), 962–968. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1998.340962.x>
- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., & Gorga, R. E. (2006). Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview. *Journal of Composite Materials*, 40(17), 1511–1575. <https://doi.org/10.1177/0021998306067321>
- Hussein, M. H., Abou-ElWaf, G. S., Shaaban-De, S. A., & Hassan, N. I. (2015). Characterization and Antioxidant Activity of Exopolysaccharide Secreted by *Nostoc carneum*. *International Journal of Pharmacology*, 11(5), 432–439. <https://doi.org/10.3923/ijp.2015.432.439>
- Jemai, R., Chalghaf, R., Boubakri, S., Amine Djebbi, M., Naamen, S., Ben Rhaiem, H., & Ben Haj Amara, A. (2024). Montmorillonite: Properties, Characteristics, and Its Harnessing in Environmental Applications. In *Recent Advances in Montmorillonite*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004763>
- Jia, S., Yu, H., Lin, Y., & Dai, Y. (2007). Characterization of extracellular polysaccharides from *Nostoc flagelliforme* cells in liquid suspension culture. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 12(3), 271–275. <https://doi.org/10.1007/BF02931103>
- KAJIYAMA, S., & KOBAYAS, A. (2003). Chemical and Biochemical Aspects of Desiccation Tolerant Cyanobacterium *Nostoc commune*. *Cryobiology and Cryotechnolo*, 49(1), 37–42.
- Kamel A. Abd-Elsalam. (2021). *Zinc-Based Nanostructures for Environmental and Agricultural Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04609-2>
- Kavitake, D., Veerabhadrapa, B., Sudharshan, S. J., Kandasamy, S., Devi, P. B., Dyavaiah, M., & Shetty, P. H. (2022). Oxidative stress alleviating potential of galactan exopolysaccharide from *Weissella confusa* KR780676 in yeast model system. *Scientific Reports*, 12(1), 1089. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05190-2>

- Kawasumi, M. (2019). Nanocomposites Based on Organic and Inorganic Materials and Their Unique Properties and Functions. *R&D Review of Toyota CRDL*, 50(2). <https://www.tytlabs.com/review/>
- Kumar, A., & Dixit, C. K. (2017). Methods for characterization of nanoparticles. In *Advances in Nanomedicine for the Delivery of Therapeutic Nucleic Acids* (pp. 43–58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100557-6.00003-1>
- Kumar, A., & Gupta, A. (2003). *Fundamentals of Polymer Engineering, Revised and Expanded*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203911891>
- Kumar, P., Sandeep, K. P., Alavi, S., Truong, V. D., & Gorga, R. E. (2010a). Effect of Type and Content of Modified Montmorillonite on the Structure and Properties of Bio-Nanocomposite Films Based on Soy Protein Isolate and Montmorillonite. *Journal of Food Science*, 75(5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01633.x>
- Kumar, P., Sandeep, K. P., Alavi, S., Truong, V. D., & Gorga, R. E. (2010b). Effect of Type and Content of Modified Montmorillonite on the Structure and Properties of Bio-Nanocomposite Films Based on Soy Protein Isolate and Montmorillonite. *Journal of Food Science*, 75(5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01633.x>
- Kumar, P., Sandeep, K. P., Alavi, S., Truong, V. D., & Gorga, R. E. (2010c). Preparation and characterization of bio-nanocomposite films based on soy protein isolate and montmorillonite using melt extrusion. *Journal of Food Engineering*, 100(3), 480–489. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.035>
- Lakshmidivi, R., Nagendra Gandhi, N., & Muthukumar, K. (2022). Bioelectricity and bioactive compound production in an algal-assisted microbial fuel cell with immobilized bioanode. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(8), 3457–3473. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00916-6>
- Le Ferrand, H., Bolisetty, S., Demirörs, A. F., Libanori, R., Studart, A. R., & Mezzenga, R. (2016). Magnetic assembly of transparent and conducting graphene-based functional composites. *Nature Communications*, 7(1), 12078. <https://doi.org/10.1038/ncomms12078>

- Lee, J., & Kim, K. M. (2010). Characteristics of soy protein isolate-montmorillonite composite films. *Journal of Applied Polymer Science*, *118*(4), 2257–2263. <https://doi.org/10.1002/app.31316>
- León, P. G., Chillo, S., Conte, A., Gerschenson, L. N., Del Nobile, M. A., & Rojas, A. M. (2009). Rheological characterization of deacylated/acylated gellan films carrying l-(+)-ascorbic acid. *Food Hydrocolloids*, *23*(7), 1660–1669. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.12.008>
- Leszczynska, A., & Pielichowski, K. (2008). Application of thermal analysis methods for characterization of polymer/montmorillonite nanocomposites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *93*(3), 677–687. <https://doi.org/10.1007/s10973-008-9128-6>
- Li, H., Xu, J., Liu, Y., Ai, S., Qin, F., Li, Z., Zhang, H., & Huang, Z. (2011). Antioxidant and moisture-retention activities of the polysaccharide from *Nostoc commune*. *Carbohydrate Polymers*, *83*(4), 1821–1827. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.046>
- Liu, J., Boo, W.-J., Clearfield, A., & Sue, H.-J. (2006). Intercalation and Exfoliation: A Review on Morphology of Polymer Nanocomposites Reinforced by Inorganic Layer Structures. *Materials and Manufacturing Processes*, *21*(2), 143–151. <https://doi.org/10.1080/AMP-200068646>
- Liu, X., Hu, M., & Hu, Y. (2008). Chemical composition and surface charge properties of montmorillonite. *Journal of Central South University of Technology*, *15*(2), 193–197. <https://doi.org/10.1007/s11771-008-0037-4>
- Mahmoud, K. H., & Abbo, M. (2013). Synthesis, characterization and optical properties of gelatin doped with silver nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *116*, 610–615. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.07.106>
- Mangolim, C. S., Silva, T. T. da, Fenelon, V. C., Koga, L. N., Ferreira, S. B. de S., Bruschi, M. L., & Matioli, G. (2017). Description of recovery method used for curdlan produced by *Agrobacterium* sp. IFO 13140 and its relation to the morphology and physicochemical and technological properties of the

- polysaccharide. *PLOS ONE*, *12*(2), e0171469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171469>
- Markl, E., Grünbichler, H., & Lackner, M. (2019). Cyanobacteria for PHB Bioplastics Production: A Review. In *Algae*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81536>
- Meiyazhagan, A., Thangavel, S., Daniel P., H., Pulickel M., A., & Palanisamy, T. (2015). Electrically conducting nanobiocomposites using carbon nanotubes and collagen waste fibers. *Materials Chemistry and Physics*, *157*, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.03.005>
- Meng, Q., Sun, Y., Cong, H., Hu, H., & Xu, F.-J. (2021). An overview of chitosan and its application in infectious diseases. *Drug Delivery and Translational Research*, *11*(4), 1340–1351. <https://doi.org/10.1007/s13346-021-00913-w>
- Mishra, A., & Jha, B. (2013). Microbial Exopolysaccharides. In *The Prokaryotes* (pp. 179–192). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31331-8_25
- Mitsuiki, M., Yamamoto, Y., Mizuno, A., & Motoki, M. (1998). Glass Transition Properties as a Function of Water Content for Various Low-Moisture Galactans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *46*(9), 3528–3534. <https://doi.org/10.1021/jf9709820>
- Nakamatsu, J., Torres, F. G., Troncoso, O. P., Min-Lin, Y., & Boccaccini, A. R. (2006). Processing and Characterization of Porous Structures from Chitosan and Starch for Tissue Engineering Scaffolds. *Biomacromolecules*, *7*(12), 3345–3355. <https://doi.org/10.1021/bm0605311>
- Naskar, A. K., Keum, J. K., & Boeman, R. G. (2016). Polymer matrix nanocomposites for automotive structural components. *Nature Nanotechnology*, *11*(12), 1026–1030. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.262>
- Nengduo, Z., Xuesong, Y., & Hao, G. (2016). Highly conductive and flexible transparent films based on silver nanowire/chitosan composite. *RSC Advances*, *6*(53), 47552–47561. <https://doi.org/10.1039/C6RA05448J>

- NINOMIYA, M., SATOH, H., YAMAGUCHI, Y., TAKENAKA, H., & KOKETSU, M. (2011). Antioxidative Activity and Chemical Constituents of Edible Terrestrial Alga *Nostoc commune* Vauch. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 75(11), 2175–2177. <https://doi.org/10.1271/bbb.110466>
- Novich, B. E., & Ring, T. A. (1984). Colloid Stability of Clays Using Photon Correlation Spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*, 32(5), 400–406. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1984.0320508>
- Ochoa-Yepes, O., Medina-Jaramillo, C., Guz, L., & Famá, L. (2018). Biodegradable and Edible Starch Composites with Fiber-Rich Lentil Flour to Use as Food Packaging. *Starch - Stärke*, 70(7–8). <https://doi.org/10.1002/star.201700222>
- Okada, A., & Usuki, A. (2006). Twenty Years of Polymer-Clay Nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 291(12), 1449–1476. <https://doi.org/10.1002/mame.200600260>
- Okamoto, M. (2023). Polymer Nanocomposites. *Eng*, 4(1), 457–479. <https://doi.org/10.3390/eng4010028>
- Omidi, M., Fatehinya, A., Farahani, M., Akbari, Z., Shahmoradi, S., Yazdian, F., Tahriri, M., Moharamzadeh, K., Tayebi, L., & Vashae, D. (2017). Characterization of biomaterials. In *Biomaterials for Oral and Dental Tissue Engineering* (pp. 97–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100961-1.00007-4>
- Othman, S. H., Ling, H. N., Talib, R. A., Naim, M. N., Risyon, N. P., & Saifullah, Md. (2019). PLA/MMT and PLA/Halloysite Bio-Nanocomposite Films: Mechanical, Barrier, and Transparency. *Journal of Nano Research*, 59, 77–93. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.59.77>
- Padsalgikar, A. D. (2017). Introduction to Plastics. In *Plastics in Medical Devices for Cardiovascular Applications* (pp. 1–29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35885-9.00001-1>
- Parikh, A., & Madamwar, D. (2006). Partial characterization of extracellular polysaccharides from cyanobacteria. *Bioresource Technology*, 97(15), 1822–1827. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.008>

- Paul, D. R., & Robeson, L. M. (2008). Polymer nanotechnology: Nanocomposites. *Polymer*, *49*(15), 3187–3204. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017>
- Paul, P., Nair, R., Mahajan, S., Gupta, U., Aalhate, M., Maji, I., & Singh, P. K. (2023). Traversing the diverse avenues of exopolysaccharides-based nanocarriers in the management of cancer. *Carbohydrate Polymers*, *312*, 120821. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120821>
- Pereira, S. B., Mota, R., Santos, C. L., De Philippis, R., & Tamagnini, P. (2013). *Assembly and Export of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Cyanobacteria* (pp. 235–279). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394313-2.00007-X>
- Ponce, E. (2014). Nostoc: un alimento diferente y su presencia en la precordillera de Arica. *Idesia (Arica)*, *32*(2), 119–121. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200015>
- Quan, Y., Yang, S., Wan, J., Su, T., Zhang, J., & Wang, Z. (2015). Optimization for the extraction of polysaccharides from Nostoc commune and its antioxidant and antibacterial activities. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *52*, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.004>
- Quispe-Quispe, L. G., Limpe-Ramos, P., Arenas-Chávez, C. A., Gomez, M. M., Mejia, C. R., Alvarez-Risco, A., Del-Aguila-Arcenales, S., Yáñez, J. A., & Vera-Gonzales, C. (2022). Physical and Mechanical Characterization of a Functionalized Cotton Fabric with Nanocomposite Based on Silver Nanoparticles and Carboxymethyl Chitosan Using Green Chemistry. *Processes*, *10*(6), 1207. <https://doi.org/10.3390/pr10061207>
- Raghavendra, P., & Pullaiah, T. (2018). Biomedical Imaging Role in Cellular and Molecular Diagnostics. In *Advances in Cell and Molecular Diagnostics* (pp. 85–111). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813679-9.00004-X>
- Raval, N., Maheshwari, R., Kalyane, D., Youngren-Ortiz, S. R., Chougule, M. B., & Tekade, R. K. (2019). Importance of Physicochemical Characterization of Nanoparticles in Pharmaceutical Product Development. In *Basic Fundamentals of Drug Delivery* (pp. 369–400). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817909-3.00010-8>

- Reports and Data. (2021). *Polymer Nanocomposites Market By Polymer, By Nanomaterial (Carbon Nanotubes, Metal Oxide, Nanofiber, Nano clay, Graphene), And By Application (Automotive & Aerospace, Electrical & Electronics), Forecasts To 2027*. . Reports and Data. <https://www.reportsanddata.com/report-detail/polymer-nanocomposites-market>
- Rhim, J.-W. (2011). Effect of clay contents on mechanical and water vapor barrier properties of agar-based nanocomposite films. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.010>
- Rhim, J.-W., & Wang, L.-F. (2014). Preparation and characterization of carrageenan-based nanocomposite films reinforced with clay mineral and silver nanoparticles. *Applied Clay Science*, 97–98, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.05.025>
- Rodriguez, S. (2016). *Desarrollo de nanocompuestos obtenidos a partir de bpolímeros de algas chondracanthus chamissoi y nostoc comune empleando nano refuerzos de almidón, arcilla y quitina*. . Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Rodriguez, S. A., Weese, E., Nakamatsu, J., & Torres, F. (2016). Development of Biopolymer Nanocomposites Based on Polysaccharides Obtained from Red Algae *Chondracanthus chamissoi* Reinforced with Chitin Whiskers and Montmorillonite. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(15), 1557–1564. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1163583>
- Rodríguez, S., Gatto, F., Pesce, L., Canale, C., Pompa, P. P., Bardi, G., Lopez, D., & Torres, F. G. (2018). Monitoring cell substrate interactions in exopolysaccharide-based films reinforced with chitin whiskers and starch nanoparticles used as cell substrates. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 67(6), 333–339. <https://doi.org/10.1080/00914037.2017.1297942>
- Rodriguez, S., Torres, F. G., & López, D. (2017). Preparation and Characterization of Polysaccharide Films from the Cyanobacteria *Nostoc commune*. *Polymers from Renewable Resources*, 8(4), 133–150. <https://doi.org/10.1177/204124791700800401>

- Ross Hallett, F. (1999). Scattering and Particle Sizing Applications*. In *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (pp. 2488–2494). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374413-5.00277-3>
- S. Dassanayake, R., Acharya, S., & Abidi, N. (2019). Biopolymer-Based Materials from Polysaccharides: Properties, Processing, Characterization and Sorption Applications. In *Advanced Sorption Process Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80898>
- S. R., A., P. K., R., N. R., S., & Mart, A. (2023). Thermal Properties of Biopolymers. In *Handbook of Biopolymers* (pp. 1–28). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6603-2_12-1
- Savas, L. A., & Hancer, M. (2015). Montmorillonite reinforced polymer nanocomposite antibacterial film. *Applied Clay Science*, 108, 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.021>
- Schmidt, D., Shah, D., & Giannelis, E. P. (2002). New advances in polymer/layered silicate nanocomposites. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6(3), 205–212. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(02\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(02)00049-9)
- Shahzad, F., Alhabeab, M., Hatter, C. B., Anasori, B., Man Hong, S., Koo, C. M., & Gogotsi, Y. (2016). Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes). *Science*, 353(6304), 1137–1140. <https://doi.org/10.1126/science.aag2421>
- Sharifianjazi, F., Khaksar, S., Esmailkhanian, A., Bazli, L., Eskandarinezhad, S., Salahshour, P., Sadeghi, F., Rostamnia, S., & Vahdat, S. M. (2022). Advancements in Fabrication and Application of Chitosan Composites in Implants and Dentistry: A Review. *Biomolecules*, 12(2), 155. <https://doi.org/10.3390/biom12020155>
- Singh, R., Gautam, S., Sharma, B., Jain, P., & Chauhan, K. D. (2021). Biopolymers and their classifications. In *Biopolymers and their Industrial Applications* (pp. 21–44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819240-5.00002-X>

- Sinha Ray, S., Okamoto, K., & Okamoto, M. (2003). Structure–Property Relationship in Biodegradable Poly(butylene succinate)/Layered Silicate Nanocomposites. *Macromolecules*, *36*(7), 2355–2367. <https://doi.org/10.1021/ma021728y>
- Sinha Ray, S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, *28*(11), 1539–1641. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>
- Sohn, J. R., & Han, J. S. (2006). *NiO-TiO₂ Catalyst Modified with WO₃ for Ethylene Dimerization* (pp. 269–272). [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(06\)81585-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(06)81585-5)
- Suresh Kumar, A., Mody, K., & Jha, B. (2007). Bacterial exopolysaccharides – a perception. *Journal of Basic Microbiology*, *47*(2), 103–117. <https://doi.org/10.1002/jobm.200610203>
- Szeluga, U., Pusz, S., Kumanek, B., Olszowska, K., Kobylukh, A., & Trzebicka, B. (2021). Effect of graphene filler structure on electrical, thermal, mechanical, and fire retardant properties of epoxy-graphene nanocomposites - a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, *46*(2), 152–187. <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1708702>
- Temina, M., Rezankova, H., Rezanka, T., & Dembitsky, V. M. (2007). Diversity of the fatty acids of the Nostoc species and their statistical analysis. *Microbiological Research*, *162*(4), 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.01.010>
- Tian, W., VahidMohammadi, A., Reid, M. S., Wang, Z., Ouyang, L., Erlandsson, J., Pettersson, T., Wågberg, L., Beidaghi, M., & Hamedi, M. M. (2019). Multifunctional Nanocomposites with High Strength and Capacitance Using 2D MXene and 1D Nanocellulose. *Advanced Materials*, *31*(41). <https://doi.org/10.1002/adma.201902977>
- Timmerman, J. F., Hayes, B. S., & Seferis, J. C. (2002). Nanoclay reinforcement effects on the cryogenic microcracking of carbon fiber/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, *62*(9), 1249–1258. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00063-5)

- Torres, F. G., Ccorahua, R., Arroyo, J., & Troncoso, O. P. (2019). Enhanced conductivity of bacterial cellulose films reinforced with NH₄⁺-doped graphene oxide. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 58(14), 1585–1595. <https://doi.org/10.1080/25740881.2018.1563135>
- Torres, F. G., Troncoso, O. P., Torres, C., Díaz, D. A., & Amaya, E. (2011). Biodegradability and mechanical properties of starch films from Andean crops. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(4), 603–606. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.01.026>
- Torres-Maza, A., Yupanqui-Bacilio, C., Castro, V., Aguirre, E., Villanueva, E., & Rodríguez, G. (2020). Comparison of the hydrocolloids *Nostoc commune* and *Nostoc sphaericum*: Drying, spectroscopy, rheology and application in nectar. *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 583–589. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.14>
- Tseng, C.-C., Yeh, H.-Y., Liao, Z.-H., Hung, S.-W., Chen, B., Lee, P.-T., Nan, F.-H., Shih, W.-L., Chang, C.-C., & Lee, M.-C. (2021). An in vitro study shows the potential of *Nostoc commune* (Cyanobacteria) polysaccharides extract for wound-healing and anti-allergic use in the cosmetics industry. *Journal of Functional Foods*, 87, 104754. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104754>
- Uddin, F. (2008). Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(12), 2804–2814. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9603-5>
- Uddin, F. (2018). Montmorillonite: An Introduction to Properties and Utilization. In *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77987>
- Udo, T., Mummaleti, G., Mohan, A., Singh, R. K., & Kong, F. (2023). Current and emerging applications of carrageenan in the food industry. *Food Research International*, 173, 113369. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113369>
- Vaezi, K., Asadpour, G., & Sharifi, H. (2019). Effect of ZnO nanoparticles on the mechanical, barrier and optical properties of thermoplastic cationic

- starch/montmorillonite biodegradable films. *International Journal of Biological Macromolecules*, *124*, 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.142>
- Wang, H.-B., Wu, S.-J., & Liu, D. (2014). Preparation of polysaccharides from cyanobacteria *Nostoc commune* and their antioxidant activities. *Carbohydrate Polymers*, *99*, 553–555. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.066>
- Wang, R., Li, H., Ge, G., Dai, N., Rao, J., Ran, H., & Zhang, Y. (2021). Montmorillonite-Based Two-Dimensional Nanocomposites: Preparation and Applications. *Molecules*, *26*(9), 2521. <https://doi.org/10.3390/molecules26092521>
- Wang, S. F., Shen, L., Tong, Y. J., Chen, L., Phang, I. Y., Lim, P. Q., & Liu, T. X. (2005). Biopolymer chitosan/montmorillonite nanocomposites: Preparation and characterization. *Polymer Degradation and Stability*, *90*(1), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.03.001>
- Wang, S., Hu, Y., Song, L., Wang, Z., Chen, Z., & Fan, W. (2002). Preparation and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposite. *Polymer Degradation and Stability*, *77*(3), 423–426. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00098-8)
- Wang, X., Yang, Z., Liu, Y., Wang, X., Zhang, H., Shang, R., Laba, C., Wujin, C., Hao, B., & Wang, S. (2022). Structural characteristic of polysaccharide isolated from *Nostoc commune*, and their potential as radical scavenging and antidiabetic activities. *Scientific Reports*, *12*(1), 22155. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26802-x>
- Wang, Y., Liu, J., Liu, X., Zhang, X., Xu, Y., Leng, F., & Avwenagbiku, M. O. (2019). Kinetic modeling of the ultrasonic-assisted extraction of polysaccharide from *Nostoc commune* and physicochemical properties analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, *128*, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.247>
- Xin, Y., Lee, J. Y., Kim, J., & Kim, Y. (2018). Effect of curdlan on textural and cooking qualities of noodles made with tofu. *Journal of Food Processing and Preservation*, *42*(8), e13661. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13661>

- Xu, Y., Wang, Y., Coda, R., Säde, E., Tuomainen, P., Tenkanen, M., & Katina, K. (2017). In situ synthesis of exopolysaccharides by *Leuconostoc* spp. and *Weissella* spp. and their rheological impacts in fava bean flour. *International Journal of Food Microbiology*, 248, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.02.012>
- Yu, Y.-H., Lin, Y.-Y., Lin, C.-H., Chan, C.-C., & Huang, Y.-C. (2014). High-performance polystyrene/graphene-based nanocomposites with excellent anti-corrosion properties. *Polym. Chem.*, 5(2), 535–550. <https://doi.org/10.1039/C3PY00825H>
- Zakuwan, S. Z., & Ahmad, I. (2019). Effects of Hybridized Organically Modified Montmorillonite and Cellulose Nanocrystals on Rheological Properties and Thermal Stability of K-Carrageenan Bio-Nanocomposite. *Nanomaterials*, 9(11), 1547. <https://doi.org/10.3390/nano9111547>
- Zamora, F., González, M. C., Dueñas, M. T., Irastorza, A., Velasco, S., & Ibarburu, I. (2002). Thermodegradation and thermal transitions of an exopolysaccharide produced by *Pediococcus damnosus* 2.6. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 41(3), 473–486. <https://doi.org/10.1081/MB-120004348>
- Zhou, C., Tong, D., & Yu, W. (2019). Smectite Nanomaterials: Preparation, Properties, and Functional Applications. In *Nanomaterials from Clay Minerals* (pp. 335–364). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00007-7>
- Zhu, T. T., Zhou, C. H., Kabwe, F. B., Wu, Q. Q., Li, C. S., & Zhang, J. R. (2019). Exfoliation of montmorillonite and related properties of clay/polymer nanocomposites. *Applied Clay Science*, 169, 48–66. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.12.006>
- Zweben, C. (2015). Composite Materials. In *Mechanical Engineers' Handbook* (pp. 1–37). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118985960.meh110>