

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**OPTIMIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE NANOCELULOSA A
PARTIR DEL ALGA *SARGASSUM SPP*, Y SU FUNCIONALIZACIÓN CON
NANOPARTÍCULAS DE PLATA PARA EL DESARROLLO DE UN NANOCOMPUESTO
CON ACTIVIDAD BACTERICIDA MEDIANTE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA**

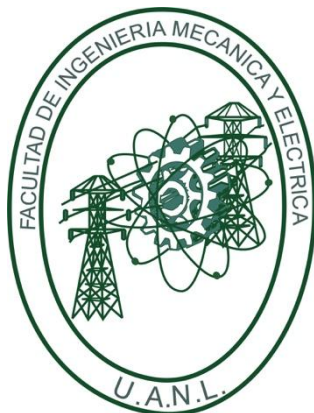
POR

RAMÓN VALDIVIA GONZÁLEZ

T E S I S

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN NANOTECNOLOGÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**OPTIMIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE NANOCELULOSA A PARTIR
DEL ALGA *SARGASSUM SPP*, Y SU FUNCIONALIZACIÓN CON NANOPARTÍCULAS DE
PLATA PARA EL DESARROLLO DE UN NANOCOMPUESTO CON ACTIVIDAD
BACTERICIDA MEDIANTE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA**

POR

ING. RAMÓN VALDIVIA GONZÁLEZ

T E S I S

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN NANOTECNOLOGÍA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "OPTIMIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE NANOCELULOSA CRISTALINA A PARTIR DEL ALGA SARGASSUM SPP, Y SU FUNCIONALIZACIÓN CON NANOPARTÍCULAS DE PLATA PARA EL DESARROLLO DE UN NANOCOMPUESTO CON ACTIVIDAD BACTERICIDA MEDIANTE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA", realizada por el estudiante Ramón Valdivia González, con número de matrícula 2173256, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Nanotecnología.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Leonardo Chávez Guerrero
Director

Dr. Julio Silva Mendoza
Co-director

Dr. Francisco Aurelio Pérez González
Revisor

Dra. Sofía Vázquez Rodríguez
Revisor

Dra. María del Refugio Lara Banda
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Azael Martínez de la Cruz
Secretario de Estudios de Posgrado

**SECRETARÍA DE
ESTUDIOS DE
POSGRADO**

Institución 190001

Programa 557511

Acta Núm. 4717

Ciudad Universitaria, a 14/07/2026

Índice

Capítulo 1.....	8
Introducción.....	8
1.1 Justificación.....	9
Capítulo 2.....	10
Marco teórico.....	10
2.1 Acumulación masiva en costas del Caribe y su impacto ecológico, turístico y económico.	10
2.2 Composición química del alga Sargassum spp.	15
2.3 Potencial del sargazo como biomasa para su valorización.	20
2.4 Valorización de la celulosa como nanomaterial y sus tipos.....	23
2.4.1 Nanocelulosa laminar.	24
2.4.2 Nanocelulosa fibrilar.	24
2.4.3 Nanocelulosa bacteriana.	24
2.5 Propiedades de la nanocelulosa laminar.	25
2.6 Métodos de aislamiento de nanocelulosa.....	25
2.6.1 Hidrólisis ácida.	26
2.6.2 Tratamientos oxidativos.....	26
2.6.3 Métodos físicos.	26
2.7 Aplicaciones de la nanocelulosa.....	27
2.8 Biocarbón.	28
2.9 Propiedades del biocarbón.....	28
2.9.1 Microporosidad y mesoporosidad.	28
2.9.2 Área superficial.	28
2.9.3 Capacidad de adsorción.	29
2.10 Métodos de obtención.	29
2.10.1 Pirólisis.	29
2.10.2 Gasificación parcial.....	30
2.10.3 Carbonización hidrotermal (HTC).....	30
2.10.4 Carbonización por microondas.	30
2.10.5 Activación (física o química).....	31
2.11 Aplicaciones del biocarbón.....	31
2.12 Nanopartículas de plata (AgNPs).	33

2.13 Propiedades fisicoquímicas de las AgNPs.	33
2.13.1 Morfología y superficie.	33
2.13.2 Reactividad.	34
2.14 Actividad antimicrobiana.	34
2.15 Aplicaciones de sistemas híbridos de nanopartículas de plata.	35
2.16 Hipótesis.	37
2.17 Objetivos.	37
2.17.1 Objetivo general.	37
2.17.2 Objetivos específicos.	37
Capítulo 3.	38
Metodología.	38
3.1 Aislamiento de nanocelulosa laminar.	38
3.2 Pirólisis rápida y síntesis de nanocompuesto	39
3.3 Estudio de la actividad antimicrobiana del nanocompuesto AgNPs/CAS.	40
3.4 Análisis de rendimiento en la valorización de biomasa de Sargassum spp.	40
3.5 Caracterización.	41
3.5.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	43
3.5.2 Microscopio confocal de barrido láser (LSM)	43
3.5.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).	43
3.5.4 Analizador de humedad.	44
3.6 Estudio de la actividad antimicrobiana del nanocompuesto AgNPs/CAS.	44
Capítulo 4.	45
Resultados y discusiones.	45
4.1 Eficiencia de componentes.	45
4.1.1 Rendimiento del alga Sargassum spp.	45
4.1.2 Rendimiento del componente aislado de Fucoidan.	47
4.1.3 Rendimiento de nanocelulosa laminar.	49
4.1.4 Rendimiento del biocarbón AgNPs/CAS.	50
4.1.5 Rendimiento del biocarbón AgNPs/NLC.	51
4.2 Análisis SEM.	52
4.3 Análisis por microscopia confocal láser (LSM).	58
4.4 Análisis por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).	59
4.5 Análisis termogravimétrico (TGA).	61

4.6 Análisis por espectroscopia de resonancia magnética nuclear (NMR).	65
4.7 Evaluación y análisis de la actividad antimicrobiana del biocarbón AgNPs/CAS.	67
Capítulo 5.	70
Conclusiones.	70
Capítulo 6.	71
Bibliografía.	71
Capítulo 7.	89

Capítulo 1.

Introducción.

El alga sargazo *Sargassum spp.* pertenece a un tipo de macroalga, la cual, a pesar de ejercer funciones vitales en los ecosistemas marinos, como brindar protección y hábitat a un gran número de especies [1], se ha presentado como uno de los mayores problemas de contaminación ambiental a lo largo de todo el Mar Caribe, afectando los sectores como el turismo, salud, navegación marina y ecosistemas costeros [2].

En un estudio realizado entre los años 2002 y 2008, el registro anual de sargazo fue de 2 millones de toneladas por año en el Mar de los Sargazos y el Golfo de México. Sin embargo, a partir del año 2011, las variaciones en la cantidad de sargazo produjeron una acumulación que se extendió desde el Mar Caribe hasta el Golfo de México alcanzando un área de aproximadamente 3.000 km², con una biomasa de más de 20 millones de toneladas (véase **Apéndice 1**) [3, 4]. Se ha registrado que personas que viven o trabajan en procedimientos de recolección en zonas afectadas han presentado repercusiones en su salud, relacionada con la exposición de emisiones gaseosas de sargazo en proceso de descomposición [6]. Por lo que el desarrollo de equipos de remoción como de aprovechamiento del alga son de alta prioridad en zonas afectadas (**Figura 1.1**) [7].

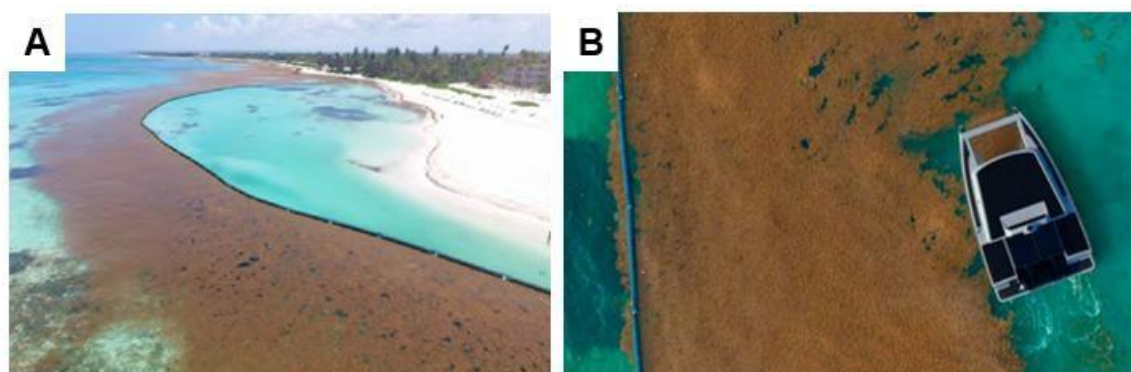


Figura 1.1 Impacto del sargazo en Punta Cana, República dominicana (A) y remoción (B) a partir del innovador equipo “Ocean Harvester de Thalasso” el cual permite una recolección autónoma y respetuosa con el medio ambiente. Tomado de *Richéda Speede et al., 2024*.

Uno de los componentes que ha cobrado relevancia en los últimos años es, la nanocelulosa, debido a sus propiedades de ligereza, biocompatibilidad, biodegradabilidad y flexibilidad, entre otras. Lo cual la sitúa como una opción factible para mejorar el rendimiento de materiales en distintos sectores, como lo son, la electrónica, embalaje sostenible, medicina, agentes bioactivos, entre otros [12]. Por otra parte, la obtención de carbón activado empleando el sargazo como materia prima ofrece un área de interés debido a su rendimiento y escalabilidad (véase **Apéndice 2**).

En esta propuesta de investigación se plantea un método de aislamiento de la nanocelulosa que incluye un tratamiento térmico seguido de un proceso de hidrólisis y posterior descomposición térmica, reduciendo y ajustando los parámetros de experimentación con el propósito de optimizar recursos, teniendo en cuenta tres aspectos claves: pretratamiento del alga, aislamiento de nanocelulosa cristalina y su funcionalización con nanopartículas de plata (AgNPs) mediante descomposición térmica. A partir de las condiciones de trabajo propuestas, se espera mejorar los rendimientos y características de los productos obtenidos. Esta propuesta también contempla evaluar las características tanto físicas (transmitancia y distribución morfológica) como químicas (funcionalización y reactividad) de los productos de nanocelulosa cristalina y el nanocompuesto obtenido, mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido y espectroscopía FTIR, UV-vis, y evaluar sus efectos bioactivos a partir de cultivos de bacterias.

1.1 Justificación.

El aprovechamiento del sargazo como materia prima para la obtención de nanocelulosa cristalina representa una estrategia innovadora y sostenible que responde a una problemática ambiental creciente en regiones costeras del Caribe y distintas zonas del Atlántico. Los arribazones masivos de sargazo, atribuidos en gran parte al cambio climático y a la escorrentía de compuestos nocivos por parte de fábricas hacia los océanos, han generado impactos ecológicos, económicos y turísticos negativos. Por lo que la extracción de nanocelulosa a partir de sargazo no solo promueve el uso de un residuo marino abundante, sino que también ofrece una alternativa biodegradable y de bajo impacto ambiental frente a materiales convencionales. La nanocelulosa presenta destacables propiedades fisicoquímicas, como alta relación superficie-volumen, resistencia mecánica y funcionalización superficial, que la convierten en una matriz ideal para el anclaje y estabilización

de nanopartículas metálicas, como las AgNPs.

El uso de nanocelulosa derivada del sargazo como matriz para la deposición de AgNPs, mediante procesos simples como la descomposición térmica, puede conducir al desarrollo de materiales compuestos con aplicaciones antimicrobianas, catalíticas o electrónicas, entre otras. En particular, las AgNPs son bien conocidas por su amplia gama de acción bactericida, lo que hace de este compuesto un candidato prometedor para aplicaciones en recubrimientos, empaques activos, textiles funcionales o aplicaciones médicas.

Con base en lo anterior, la presente investigación, además de innovar en la síntesis de nanomateriales compuestos de bajo costo, contribuye a la posibilidad de planes de gestión de residuos con propósitos de remediación ambiental, y así reducir el impacto del sargazo en ecosistemas costeros, así como promover la economía circular, al transformar un residuo en un recurso tecnológico útil. Esto la convierte en una propuesta con potencial científico, ambiental y social significativo.

Capítulo 2.

Marco teórico.

2.1 Acumulación masiva en costas del Caribe y su impacto ecológico, turístico y económico.

Desde el año 2011 se vive una de las mayores crisis ambientales a lo largo de toda la costa del Caribe, la acumulación de grandes volúmenes del alga *Sargassum spp.* pone en jaque año tras año a un gran número de sectores que buscan como frenar esta amenaza medio ambiental. Con picos de actividad la mayor parte del año, este tipo de alga parece que ha permitido la formación de una población “permanente” con aumentos acorde a condiciones que favorezcan su proliferación. Por lo que, debido a las grandes cantidades de biomasa acumuladas, diversos grupos se han dado a la tarea de recolectar y así, tratar de minimizar el impacto a sectores como el marítimo, turístico, salud, fauna marina, entre otros. Por otro lado, distintas asociaciones emprendedoras y grupos de investigación han apostado por explorar y aprovechar este recurso, el cual puede tener un potencial

económico prometedor a gran escala, y así mismo, reducir el impacto ambiental y promover su valorización.

A pesar de los esfuerzos por aprovechar el sargazo como materia prima sustentable, no se ha desarrollado ninguna actividad o emprendimiento a gran escala que permita el uso de este recurso de manera considerable; a su vez, el empeño por parte de grupos dedicados a la remoción del alga ya sea, de manera terrestre o marítima, no han sido suficientes debido a la cantidad masiva de aglomeración, además del costo y riesgo a la salud que esto supone. Estos inconvenientes han provocado la disminución de los grupos dedicados a este tipo de actividades, lo que deriva en la selección de áreas específicas para la remoción, siendo estas enfocadas principalmente en áreas de interés turística con alto derroche económico. Por lo que, esto supone un incremento del alga en diversos sitios que no cuentan con el mantenimiento necesario, lo que deriva en una mayor duración del alga en la zona y su subsecuente descomposición natural, lo cual genera gases como metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno; cabe resaltar que la liberación de estos gases también son un efecto producido por la creciente contaminación provocada por fábricas y a su vez por su estancamiento en aguas poco profundas; así mismo, esto también produce sitios costeros “muertos”, causando alteraciones en la reproducción de especies, mortandad y la formación o sustitución de nueva flora marina, producto de los lixiviados tóxicos [22].

El constante crecimiento y daño generado por parte del sargazo se ha atribuido a una serie de factores derivados principalmente de efectos marítimos, los cuales van desde, factores naturales y climáticos como, cambios en las corrientes oceánicas y la constante elevación de la temperatura en el mar, eventos de ciclónicos y tormentas que dispersan el sargazo a nuevas zonas, fenómenos antropogénicos como, fertilizantes agrícolas, aguas residuales urbanas, escorrentía de nutrientes que proliferan el aumento de sargazo, entre otras. De manera más específica, el aumento en la cantidad de CO₂ puede favorecer la fotosíntesis de macroalgas como el sargazo, lo cual, acompañado con la alteración de patrones de lluvia y vientos, provoca la propagación más allá del mar de los sargazos hacia zonas como el Atlántico ecuatorial. Actualmente, a toda esta zona afectada se le ha denominado como, “Gran Cinturón de Sargassum Atlántico”, extendiéndose desde el oeste de África hasta zonas de Florida, del Caribe, Golfo de México y Brasil, alcanzando una acumulación de aproximadamente 24.2 millones de toneladas en junio de 2022.

Tabla 0.1 Primeros registros de acumulación masiva de sargazo en países y territorios del Caribe occidental y central, primer arribo, abundancia (M: moderado, H: alto, VH: muy alto) y áreas específicas afectadas. Adaptado de, Rodríguez-Martínez et al., 2025.

País/territorio	Primer arribo	Abundancia	Zonas afectadas
Belice	2014	M-H	Bahías y costa oeste
Islas Caimán	2015	M-H	Todas las islas
Colombia	2014	M-H	Isla San Andrés, costa Noroeste
Costa Rica	2012	M-H	Costa Este
Cuba	2012	L-M	Costa este y noroeste
República dominicana	2011	M-H	Alrededor de toda la isla
Guatemala	Sin datos	L	Costa este
Haití	2011	M-H	Alrededor de toda la isla
Honduras	Sin datos	L-H	Islas de la bahía
Jamaica	2014	L-VH	Alrededor de toda la isla
México	2014	M-VH	Este de la Península de Yucatán y Golfo de México
Nicaragua	Sin datos	L	Costa este
Panamá	2022	M-H	Costa este
Puerto Rico	2018	M-VH	Suroeste, este y costas surestes
Islas Turcas y Caicos	2015	M-H	Todas las islas

En la **Tabla 2.1** se muestran los primeros registros de acumulación por parte del alga *Sargassum spp.*, desde entonces, la investigación y monitoreo sobre este tipo de alga ha sido un tópico de suma importancia en los últimos 5 años. *Rodríguez-Martínez et al., 2025*. Identificaron 520 artículos científicos a partir de una revisión sistemática (2000-2024), siendo un 82% con una antigüedad no mayor a 5 años; de estos, 240 se centraron en el monitoreo satelital a lo largo del Atlántico, el Caribe y el Golfo de México [23].

El siguiente monitoreo de sargazo en la zona norte y sur de Quintana Roo (**Figura 2.1**) permite visualizar el desgaste recurrente en las playas, el cual, no solamente se ve reflejado por el impacto

del sargazo, sino también por la limpieza periódica, lo que resulta en pérdidas anuales de sedimentos (arena, grava o conchas); esto ocurre principalmente en zonas con mayor afluencia de turismo, donde el material se reubica fuera de la playa, generando cambios geomorfológicos debido a los acaparamientos de nuevos espacios.

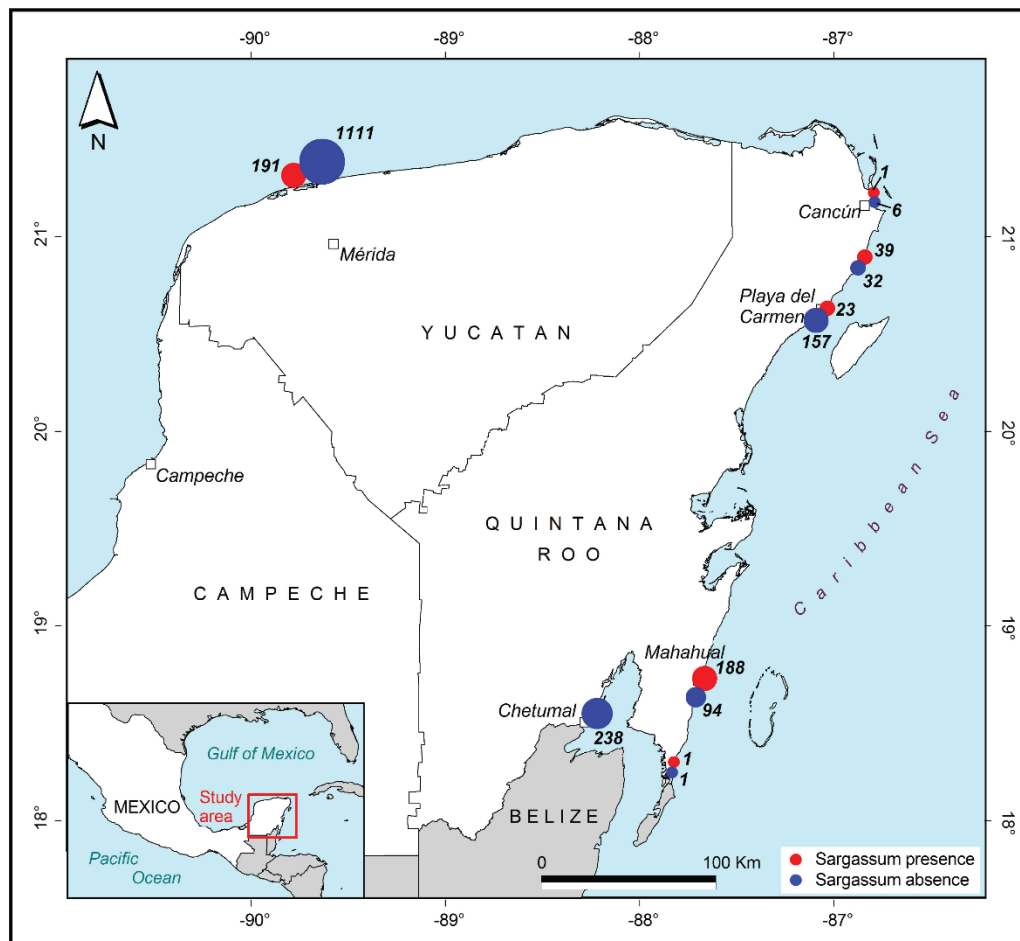


Figura 2.1 Puntos de acumulación de *Sargassum spp.* a través de monitoreo satelital. Tomado de Arellano-Verdejo & Lazcano-Hernández, 2021.

Es por ello por lo que el monitoreo y predicción satelital de arribazones de sargazo ha sido de suma importancia para el gobierno, permitiendo sobrellevar las constantes llegadas, así como proporcionar oportunidades para su valorización. Anteriormente, el seguimiento terrestre y marítimo era la principal fuente de datos estadísticos con respecto a los asentamientos de sargazo generados. No obstante, estos datos fueron variando e incrementando constantemente al punto de que este tipo de herramientas de seguimiento fueron insuficientes e ineficientes.

Actualmente y gracias a este tipo de herramientas de gestión satelital de fácil acceso, el gobierno, grupos de investigación, embarcaciones, e inclusive comunidades costeras pueden entender de una mejor manera este tipo de fenómeno, permitiendo una mejor cuantificación y entendimiento de este fenómeno medio ambiental de manera remota, frecuente y confiable.

No obstante, el propósito principal de llevar a cabo un seguimiento constante de la actividad del sargazo es complementar esta información del movimiento y sus áreas de concentración, con la posibilidad de un uso rentable y escalable. Se necesita más investigación para una implementación exitosa de este material en algún área de oportunidad, ya que, a pesar de contener componentes químicos que lo hacen factible, la complejidad en su composición, así como sus costos de manipulación, limpieza y transporte requieren de una planificación tanto en gestión de recursos como empresarial para adaptarse a un negocio viable y en los modelos de desechos de la economía circular. *Bauta et al., 2024* reportaron que, la variabilidad en la composición de las algas a pesar de ser compleja no parece ser un impedimento para su futura explotación, sin embargo, los altos niveles de metales pesados pueden ser un reto complicado de sobrellevar en aplicaciones que involucren el desarrollo de materiales compuestos, alimento para ganado, fertilizantes, entre otros. Se ha planteado su uso en la obtención de energía a través de procesos de biorrefinería, para posteriormente separar las fracciones de interés a través de complejos industriales, aprovechando así los componentes de las algas [4, 24].

Por otro lado, para que el sargazo pueda ser un material sosteniblemente viable, se ha investigado su estatus en cuanto al nivel o presencia de metales pesados en distintas fracciones; esto debido a que la presencia de este tipo de elementos presenta un peligro para la seguridad y calidad a la hora de considerarlo una materia prima efectiva para su aplicación. *Lee et al., 2023* informaron a través de un análisis hecho en cuatro localidades del Caribe que la absorción de metales pesados como, mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) o arsénico (As) depende en muchas ocasiones de la escorrentía agrícola, contaminación del agua de mar o bioacumulación de pesticidas principalmente, influyendo directamente en la biodisponibilidad, lo cual, prolifera los niveles en cuanto a la presencia y adsorción de este tipo de metales [25]. Esto destaca aún más la necesidad de investigación no solamente en cuanto al monitoreo de zonas de acumulación, sino también en cuanto a aspectos fisicoquímicos y exploración acerca de los niveles de absorción del sargazo con

respecto a estos componentes, y con ello establecer un estándar de tratamiento para su óptimo uso en la industria.

2.2 Composición química del alga *Sargassum* spp.

El alga parda *Sargassum* spp. contiene una serie de componentes químicos, como lo son los alginatos, nutrientes fenólicos, fucooidanos, laminarina, celulosa, entre otros. Esto lo vuelve en una materia prima ideal y versátil para ser utilizada por diversas industrias con distintos propósitos. No obstante, la composición en las especies de *Sargassum* varía de acuerdo con una serie de factores biológicos y ambientales como, la especie y genética, etapas de crecimiento (variación en la predominancia de componentes), temporada, condiciones ambientales, zona geográfica, condiciones de estrés (salinidad o contaminación), entre otros [1].

La composición química es un factor determinante y funciona como una herramienta taxonómica imprescindible para la distinción de especies según el tipo de metabolito o la estructura. En el caso de algunas especies de sargazo esta herramienta ha sido evaluada con respecto a, por ejemplo, composición de aminoácidos, ácidos grasos poliinsaturados, pigmentos, terpenos, esteroides, entre otros [26].

El estudio de estos componentes busca principalmente explorar una vía de valorización con características hacia una óptima escalabilidad. Las investigaciones están basadas principalmente en la estandarización de familias constituyentes a partir de protocolos de caracterización. Para ello se emplean distintas propiedades para clasificar las algas, éstas pueden incluir la naturaleza de la clorofila, la química de las paredes celulares, así como la flagelación. En el caso de las algas pardas, de las cuestiones más importantes es con respecto a la pared celular (compuesta por tres polisacáridos principalmente: alginato, celulosa y fucooidan (**Figura 2.2**), ya que nos permite entender de una mejor manera los mecanismos de biosorción, y en este caso, entender su variabilidad en cuanto a distintos factores (zona, estación del año, corriente oceánica, entre otros [27].

La **Tabla 2.2** muestra algunos componentes dentro de la composición química en las algas marrones [28].

Tabla 2.2 Principales características, y composición de las algas marrón. Recuperado de Davis & Davis, 2019.

División	Nombre	Pigmentos	Composición	Pared celular	Ref.
Phaeophyta	Alga marrón	Clorofila a, c; betacaroteno y fucoxantina y otras xantofilas	Laminarano (beta-1,3-glucopiranosida, predominantemente); manitol.	Celulosa, ácido alginico y mucopolisacáridos sulfatados (como fucoidan).	Davis & Davis, 2019.

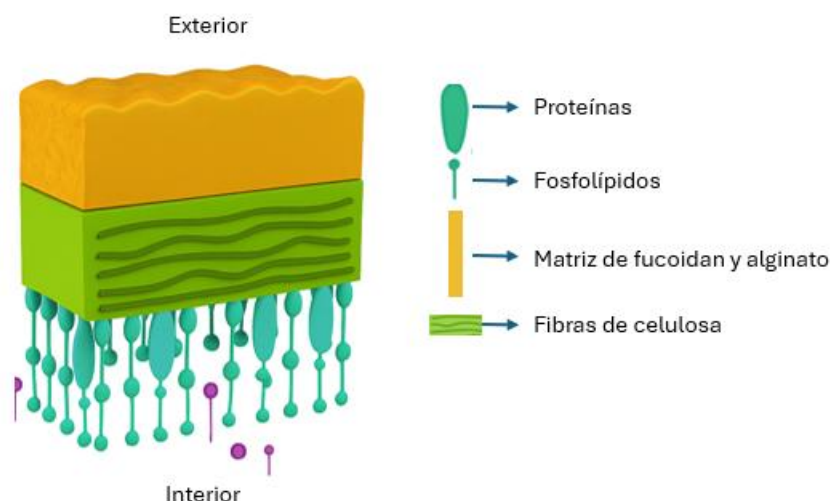


Figura 2.2 Sección de matriz amorfa (**exterior**) y esqueleto fibrilar (**interior**) de la pared celular. Readaptado de Deniaud-Bouët et al., 2014.

Dentro de estos componentes, se describe a los alginatos como polisacáridos lineales compuestos por dos monómeros principales: el ácido β -D mannurónico (M) y el ácido β -L-gulurónico (G) derivados de la manosa, el cual se oxida a ácido carboxílico para dar lugar a ácido mannurónico; dichos componentes urónicos se unen a través de un enlace glucosídico ($1 \rightarrow 4$) β o en su defecto α (**Figura 2.3**). Estos a su vez están presentes junto con los fucoidanos en la pared celular y en la matriz intercelular de las algas pardas, proporcionándoles rigidez estructural y control en cuanto a su grado absorción [29].

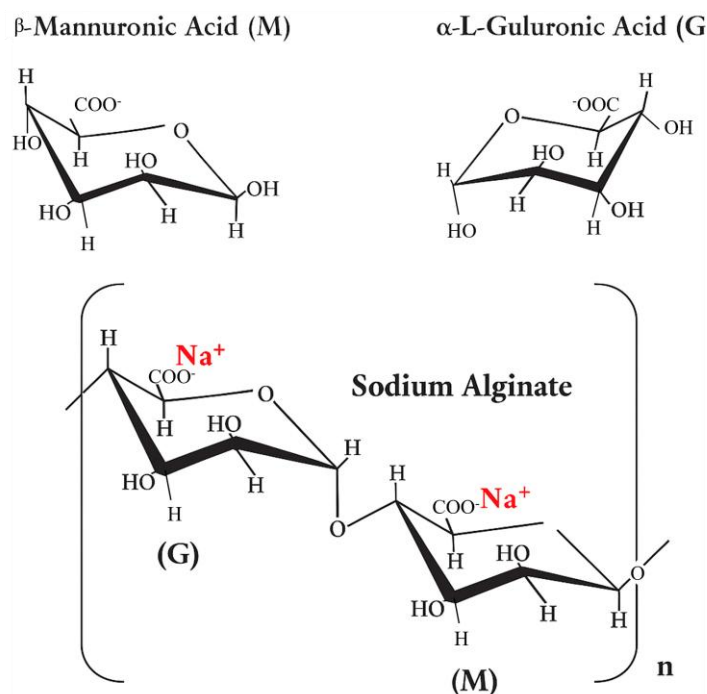


Figura 2.3 Ácido mannurónico y gulurónico, y su estructuración en el componente de alginato de sodio. Tomado de Rezende et al., 2024.

El alga *Sargassum spp.* presenta un buen nivel en cuanto a la cantidad de polisacáridos sulfatados se refiere (fucoidanos). La estructura de este componente varía según su clase, sin embargo, en la mayoría de los casos se encuentra estructurado por polisacáridos ramificados complejos compuestos por monosacáridos múltiples como la fucosa, ramnosa, xilosa, galactosa, así como ácido glucurónico y grupos sulfatos; estos mismos le confieren diferentes características bioactivas, como antioxidante o antiinflamatorio, por ejemplo, Hifney et al., 2015 [30] presentó a partir de un estudio en la extracción de fucoidan crudo del alga *Sargassum spp.* que la actividad antioxidante depende en gran medida de la combinación de varios factores estructurales (composición de azúcares, fucos, grupos sulfatos, entre otros). Esto sugiere que su composición en crudo sin purificación adicional podría utilizarse en distintas aplicaciones (cosméticos o farmacéutico), permitiendo aprovechar este recurso abundante de una manera sencilla y escalable.

Este componente es complejo y variado, y suele referírsele como fracción *fucoidana* o *fucoidan*, debido a los diferentes tipos de enlaces glucosídicos que se forman en su matriz, así como su interacción con grupos de acetato y ramas con contenido de fucosa u otros elementos, sumado a esto, factores como su extracción, pretratamiento, interacción con otros grupos o contenido de

metales pesados, hace de su caracterización una tarea difícil, variando en si sus estudios y determinada estandarización.

A pesar de ello, el creciente interés en la extracción de diversos elementos, por su diversidad bioactiva y demás componentes como la fucoxantina, clorofilas a y c, carotenoides, así como sustancias de reserva, aceites y polisacáridos (como la laminarina) [31], hacen ver a este tipo de alga como una propuesta atractiva hacia el sector inversionista y de carácter empresarial. Así mismo, otro de los componentes estructurales de este tipo de alga es la celulosa contenida también en la pared celular. En particular esta composición en celulosa presenta un menor contenido de lignina en algas marrones en comparación con otras fuentes de extracción, posicionándola como un candidato ideal para su uso como materia prima sustituta de las fuentes de madera actual [32].

A principios del siglo pasado, las investigaciones sobre las paredes celulares de algas pardas revelaron la presencia de estos componentes puros que podían ser aislados de ciertos tipos de alga. Diversos estudios de esa época se centraron en caracterizar la estructura de la celulosa a partir de distintas especies como *Sphacelaria radicans*, *Pelvetia fastigiata*, *Ectocarpus siliculosus*, entre otras [33]. En el período desde 1970 hasta finales de siglo, el enfoque principal estuvo situado en la extracción de alginato y fucoidanos, así como la mejora en los métodos de separación con el propósito de obtener un material más puro.

No fue sino hasta inicios del siglo XXI, que el desarrollo en métodos de extracción para componentes celulósicos entró en auge y la demanda de esta aumentó, debido a su gran versatilidad en una amplia gama de aplicaciones emergentes en el sector industrial. Si bien, una de las fuentes principales y más estudiadas es la madera, su constante explotación la pone en una delicada situación ambiental. Es por ello por lo que la búsqueda de fuentes alternativas se ha disparado, siendo una de estas opciones las algas.

Se ha demostrado que la extracción de este componente celulósico a partir del alga *Sargassum spp.* se sitúa en un porcentaje de entre el 9.2 – 13.2 % con respecto a su contenido en seco; otros estudios con respecto a diversas algas del tipo marrón la sitúan entre un 10 – 13 % cumpliendo con un estándar aproximado [34, 35]. Por otro lado, también se ha reportado que su contenido puede llegar hasta porcentajes del 2-5% [36]. Esto puede deberse a la sección de alga que se considere, por

ejemplo, el estipe contiene una mayor cantidad frente a otras secciones como lo son, las láminas (hojas) o los pneumatocitos (**Figura 2.4**).

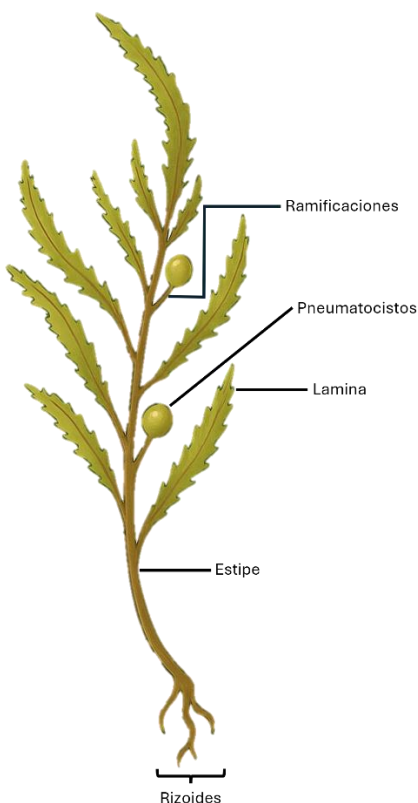


Figura 2.4 Estructura del cuerpo del alga *Sargassum spp.*

La celulosa (**Figura 2.5**) está compuesta por una serie de unidades de anillos D-glucopiranososa (4C1-formato de silla), a su vez, dichas unidades están unidas mediante enlaces glucosídicos β -1,4, alternando en 180° cada sección de la cadena de celulosa. Así mismo, en dicha formación básica existen tres grupos OH^- en cada unidad anhidro glucosa (AGU): un grupo primario en C6 y dos grupos secundarios más en el C2 y C3 en la sección del anillo plano. Los extremos de dicho componente son diferentes, un extremo contiene un átomo de C anomérico unido mediante enlaces glucosídicos (no reductor), por otro lado, el otro extremo tiene una unidad D-glucopiranososa (grupo reductor).

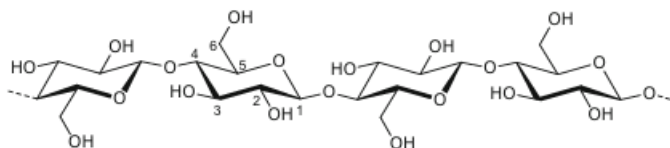


Figura 2.5 Representación de la estructura de la celulosa.

La variación en su estructura o descomposición molecular está basada a partir de reacciones como la hidrólisis u oxidación de la cadena de celulosa, teniendo lugar principalmente en la superficie fibrilar o en regiones amorfas [37].

2.3 Potencial del sargazo como biomasa para su valorización.

Las algas marinas como materia prima para la producción a gran escala en diferentes sectores se han visto sumamente redituable, debido a su gran abundancia y distribución en todo el mundo. Además, cuentan con diferentes propiedades bioactivas que son de interés para sectores como el farmacéutico y la biomedicina. Considerada una economía viable después de los recursos agrícolas, la explotación de recursos oceánicos se proyecta como un área de oportunidad activa, con un campo de investigación atractivo para la implementación de tecnologías verdes.

Se han reportado estudios en cuanto a la investigación de componentes aislados derivados del sargazo. Si bien, presentan una efectividad en cuanto a la obtención de materiales de alto valor, requieren usualmente procesos costosos, así como equipos y reactivos especializados, además de los costos de energía. Es por ello por lo que se ha planteado redirigirlos como subproductos derivados de un producto principal para su máxima optimización. Sin embargo, para ello se requiere el desarrollo de métodos que permitan tratar las cantidades masivas de sargazo de una manera rápida y eficiente.

Actualmente, múltiples tipos de algas del tipo *Phaeophyceae* se han visto como un problema debido a su gran expansión. *Jesus et al., 2023* informaron que el *sargassum muticum* es un alga que actualmente se considera invasiva, esto debido a diversos factores como, alta fecundidad y auto fertilización lo que permite su alto potencial de colonización y dispersión llegando hasta costas europeas. A pesar de ello, se demostró un óptimo rendimiento en la extracción de componentes fenólicos a partir de determinados disolventes eutécticos y técnicas de intensificación como, ultrasonido y las microondas, logrando establecer una estrategia para el aprovechamiento de este tipo de algas consideradas residuos [38].

Debido a esto, el planteamiento de gestión de recursos cada vez se visualiza más como una oportunidad de mercado y rendimiento económico detrás del subsecuente problema que este conlleva. Por ejemplo, *Desrochers et al., 2020* reportaron una serie de propuestas tomando en cuenta distintos entornos de necesidad emergentes tanto en las zonas afectadas por el sargazo, así como panoramas de exigencia activa como, el sector agrícola, energético, producción de plásticos, remediación ambiental, industria textil, así como más especializados tales como la cosmética, el sector farmacéutico y el biomédico [39]. Algunas de estas propuestas fueron iniciativas de habitantes en las zonas afectadas, los cuales, con el fin de mitigar la constante acumulación, recogían el sargazo para utilizarlo de manera directa sin ningún tipo de tratamiento específico. Si bien, esto podría ser una solución factible para cierto tipo de aplicaciones, la realidad es, que este tipo de acciones terminan por afectar en gran medida si no se cuenta con un control o gestión de parámetros adecuados. Producto principalmente a las altas concentraciones por absorción de metales pesados, por ejemplo, del arsénico, si este es de naturaleza orgánica (organoarsénico, ácido metilarsónico, ácido dimetilarsínico) los cuales no son potencialmente dañinos y se encuentran usualmente en un porcentaje bajo con respecto a su acumulación por parte de subregiones oceánicas, o por contraparte si este es de naturaleza inorgánica (arsenito (AsIII) y arsenato (AsV)) los cuales son altamente tóxicos. Se especula que la disponibilidad de estas especies está asociada a procesos naturales y muy potencialmente con actividades antropogénicas, lo cual aumenta su concentración de manera considerable [40].

Con un potencial parcialmente consagrado y con efecto comercial, empresas como “Sargablock” mostraron la capacidad de esta materia prima para el desarrollo de bloques de construcción (ladrillos) compuestos de sargazo en un 40 %, logrando construir aproximadamente 1000 bloques diarios. Esto da hincapié a la versatilidad del sargazo en el área de la construcción, fomentando su posible implementación en prácticas como el refuerzo de materiales para mejorar su resistencia a la deformación y resistencia térmica. Así mismo, *B.A. Salazar-Cruz et al., 2020* desarrollaron modificadores asfálticos a base de sargazo, demostrando resultados eficientes en cuanto a estabilidad térmica, mejorando la compatibilidad entre el sargazo y el asfalto. Si bien, opciones como estas, fomentan el uso del sargazo, carecen del factor principal, el cual es el desarrollo o escalabilidad en cuestión de utilizarlo en grandes cantidades. Por lo tanto, se han desarrollado iniciativas innovadoras inspiradas en el constante desafío que involucra no solamente el aprovechamiento si no también una vía rápida y constante en el manejo de esta materia prima,

enfocándose principalmente en maneras eficientes de recolección, manejo del alga y explotación del material [41]. Por otro lado, *Gray et al., 2021* desarrollaron un dispositivo de recolección denominado “Littoral Collection Modules” de bajo impacto y potencialmente escalable económicamente, el cual se adjunta a un barco de pesca permitiendo la recolección y reubicación de sargazo hacía las profundidades del océano [42]. Por lo que, la combinación entre proyectos atractivos y herramientas que permiten el manejo eficiente del sargazo, hacen que cada vez más su uso e investigación sea una idea visionaria.

Actualmente, existen proyectos como los de la fundación *Solar Impulse* la cual, plantea la extracción de alginatos y celulosa a partir de sargazo para luego combinarlos con materiales biodegradables o polímeros con vista en la producción de bioplásticos. Esto les ha permitido desarrollar una espuma de embalaje “GreenShell” como alternativa al uso del poliestireno, la cual es económicamente viable, logrando propiedades óptimas para su implementación en distintas aplicaciones [43]. Por otro lado, iniciativas con un enfoque en la industria cosmética han planteado el aprovechamiento de las propiedades antifúngicas, antibacterianas y antioxidantes del sargazo, siendo una de ellas “Spargassum” la cual fue creada de manera artesanal en una comunidad de trinidad y Tobago, cumpliendo con los estándares en cuanto a contenido de metales pesados se refiere, teniendo una aceptación entre la comunidad nativa de personas y negocios, manejando un servicio de baja circulación actualmente [44].

Por otro lado, estudios sugieren que el sargazo contiene una cantidad considerable de micro y macronutrientes, lo cual resalta su uso para el desarrollo de bioestimulantes o biofertilizantes. Habitantes de la zona caribeña adoptaron este material para el desarrollo de fertilizantes y composta, debido a la sencillez del pre y tratamiento dado al alga para su efectividad en producciones agrícolas. Esto ha dado lugar a que empresas como *Algas Organics*, *Grogenics*, *Dianco* y *Red Diamond* procesen aproximadamente 200,000 toneladas de sargazo por año para el desarrollo de este tipo de compuestos [7].

Asimismo, un elemento puro aislado con óptimos índices en porcentajes de extracción, es la celulosa, la cual a inicios de siglo gano renombre al ser extraída a partir de este tipo de recurso, así mismo, en años recientes se ha logrado la extracción de nanocelulosa, un material con un alto valor comercial, el cual, a pesar de ser extraído con métodos agresivos y pocos escalables, han permitido visualizar lo que puede ser una necesidad emergente en cuanto al establecimiento de un estándar

para su producción escalable y óptimo desarrollo en aplicaciones como materiales avanzados o sectores más específicos.

Además, las cuestiones de procesamiento y el control de metales pesados es una tarea complicada, este tipo de iniciativas nos permiten ver el potencial en el uso del sargazo y sobre todo en el combate contra la constante afluencia en las zonas afectadas.

2.4 Valorización de la celulosa como nanomaterial y sus tipos.

La celulosa se ha establecido como un recurso con un potencial altamente viable y considerado por muchas industrias debido a su versatilidad y alta abundancia. Su uso en materiales compuestos permite cumplir con las altas demandas y problemas actuales en cuanto a reducción de costos y sostenibilidad; su campo se extiende en sectores como el automotriz, aeronáutica, construcción, plásticos, gas, entre otros. Por otro lado, el campo de la nanotecnología ha permitido la introducción de los denominados “nanomateriales” los cuales han demostrado tener un mejor rendimiento en aplicaciones donde se requiere una alta calidad en cuanto a desempeño y optimización de recursos. Es por ello por lo que la sinergia entre este tipo de materiales y tecnologías permite un prospecto optimizado en cuanto a propiedades únicas que sugiere la escala nanométrica. Además, el impulso por el desarrollo y fabricación de estos materiales no solo intensifica el uso de materias primas de carácter renovable si no que permite establecer su introducción a problemáticas y aprovechamiento en la gestión de residuos.

Por lo tanto, la nanocelulosa se ha establecido como un material sugerente por sus características propiedades, convirtiéndolo en tema de interés e investigación para su aplicación en distintas corrientes tecnológicas. Dentro de sus capacidades como material emergente se destacan sus excelentes propiedades como su alta resistencia adecuada para el reforzamiento de polímeros, modulo elástico reportado en 143 GPa, una alta área superficie específica, baja densidad, biocompatibilidad y degradabilidad, entre otros [45].

Una de las cuestiones que lo hace resaltar en su uso como material polimérico viable es su masiva abundancia y biodegradabilidad. Desde hace algunas décadas la batalla contra la disminución en el uso del petróleo y la generación de materiales basados en hidrocarburos nos ha permitido observar que a pesar del atractivo impacto positivo en reducción de costos y adecuación a nuestras necesidades, los daños o consecuencias a largo plazo por el uso de esta fuente no renovable dejan

una huella negativa, afectando principalmente ecosistemas terrestres y marinos, daño a flora y fauna, así como resultar dañino para el ser humano y animales debido a su diversificada exposición, provocando el deterioro en sistemas como, el respiratorio, neurológico, renales, hematológicos, entre otros [46]. Esto ha permitido la formación de una creciente corriente en el desarrollo de nuevas *tecnologías verdes*, permitiendo posicionar a materiales como la nanocelulosa como una opción sustituta que no afecta negativamente nuestro ecosistema.

La nanocelulosa puede categorizarse en tres clases distintas: Nanocrystal de celulosa (CNC), celulosa nanofibrilada (NFC) y celulosa bacteriana (BC). Su clasificación va de acuerdo principalmente a su método de preparación, fuente, función y dimensión [47].

2.4.1 Nanocelulosa laminar.

Su síntesis está basada principalmente en la separación de las fibras utilizando la técnica de hidrólisis ácida, esto permite la obtención de partículas con un alto porcentaje de cristalinidad aproximadamente entre un 71-81% [47]. Estas partículas o cristales rígidos en forma de varilla tienen un diámetro en el rango de 2 a 20 nm, con longitudes desde 100 hasta 250 nm. Uno de los aspectos importantes a partir del tratamiento de hidrólisis con ácido sulfúrico, es que poseen cargas negativas en su superficie lo cual mejora su estabilidad en soluciones acuosas, derivado de la formación de grupos éster de sulfato [48].

2.4.2 Nanocelulosa fibrilar.

Este tipo de nanocelulosa es obtenida principalmente a partir de fibra de celulosa por desintegración mecánica, la celulosa nanofibrilada se describe como un nanomaterial celulósico largo y flexible, que tiene un diámetro a nanoescala (menor a 100 nm) y una longitud típica de varios micrómetros [49]. Es principalmente producido mediante presión mecánica al deslaminar la pulpa de madera a través de un tratamiento químico enzimático [47].

2.4.3 Nanocelulosa bacteriana.

La nanocelulosa bacteriana puede llegar a ser sintetizada por ciertas especies bacterianas, presentando una alta estructura molecular y una nanoestructura inherente, lo que le confiere propiedades como la multifuncionalidad, buenas propiedades mecánicas, hidrofiliidad, biocompatibilidad, entre otras. El principal productor de BC es la bacteria Gram negativa *Gluconacetobacter xylinus*. Su extracción se basa principalmente en 4 etapas, activación de monosacáridos a través del desarrollo de nucleótidos de azúcar, polimerización que conduce al

ensamblaje de unidades de azúcar repetidas, adición a tiempo de grupos acilo (si están presentes) y creación de BNC desde el citoplasma de la célula al entorno externo a través de la membrana celular [50].

2.5 Propiedades de la nanocelulosa laminar.

Dentro de las propiedades de la nanocelulosa laminar se destacan principalmente su carácter nanométrico, compuesto fundamentalmente por fibrillas alargadas de longitudes variadas las cuales le proporcionan una óptima relación superficie-volumen, permitiendo proveer una mayor rigidez y resistencia. Respecto a sus propiedades ópticas como transparencia y un considerable índice de cristalinidad, la hacen adecuada en aplicaciones como, el desarrollo de películas para embalaje o dispositivos optoelectrónicos. Al derivar de fuentes renovables, mantiene un carácter biodegradable y biocompatible, sin toxicidad aparente y pudiéndose degradar de una manera sencilla (con el tratamiento adecuado). Así mismo, su composición por regiones cristalinas le permite una estructura y química superficial resistente para aplicaciones de naturaleza biológica. Es por estas características que se ha establecido como un material sumamente atractivo en múltiples sectores de la industria, abriéndose paso como un material con alto impacto y valor para el mercado futuro [12, 51].

2.6 Métodos de aislamiento de nanocelulosa.

Actualmente, los tratamientos para desintegrar la celulosa en nanocelulosa requieren de diversos pasos que impiden su escalabilidad a la industria y subsecuente aplicación, siendo altamente agresivos para el medio ambiente debido a los reactantes ácidos utilizados para la extracción. Por otro lado, la implementación de técnicas amigables como, la extracción *enzimática*, ha cobrado relevancia debido a su potencial de operación más sostenible que los procesos químicos. Sin embargo, inconvenientes como, los altos costos y factores técnicos frenan el potencial de este tipo de procedimientos [52, 53].

Dentro de estos métodos de extracción se encuentra la vía mecánica, química y una sinergia de las dos anteriores. Particularmente, algunos aspectos de la metodología cambian con respecto al origen de la materia prima, sin embargo, los más utilizados y que han permitido un rendimiento óptimo son los siguientes:

2.6.1 Hidrólisis ácida.

Actualmente la hidrólisis ácida mediante ácido sulfúrico sigue siendo una de las mejores opciones en cuanto a extracción de nanocelulosa laminar. Por lo que su implementación para obtener este recurso a partir de del alga *Sargassum* spp. se ha planteado como una opción eficaz. La extracción se basa en el uso de ácido sulfúrico, el cual produce que las largas cadenas poliméricas de la celulosa se fracturan en partículas sólidas más pequeñas, permitiendo la formación de nanocristales de celulosa (CNC) [54]. Es decir, disuelve las regiones amorfas de la celulosa y preserva las regiones cristalinas a partir de la esterificación de grupos hidroxilo por iones sulfato [55]. Si bien, este tipo de extracción es óptima, el análisis sobre los parámetros de una determinada materia prima en cuanto a la extracción es vital para obtener resultados eficientes y controlados en cuanto a sus propiedades, siendo los más importantes en cuanto al tiempo de reacción, temperatura, concentración del ácido y mecanismos de absorción [56].

2.6.2 Tratamientos oxidativos.

El método por extracción TEMPO (2,2,6-tetrametilpiperidino-1-oxilo) es un proceso de oxidación selectiva en el que se emplea un sistema TEMPO, NaBr y NaClO para llevar a cabo la oxidación específica de grupos hidroxilo de la celulosa seguida de una desintegración leve sucesiva en agua, permitiendo la obtención de nanofibras de celulosa [57]. Este tipo de técnica mantiene las propiedades que se desean en la nanocelulosa y es amigable con el medio ambiente lo que lo vuelve en un excelente candidato como material en compuestos y embalaje biodegradables, así como de materiales filtrantes o sosteniblemente funcionales [58].

2.6.3 Métodos físicos.

Se han implementado técnicas como homogeneización a alta presión, ultrasonido, molienda mecánica y microondas para descomponer la celulosa en escala nanométrica [59]. El proceso por microondas solía tener efectos negativos en cuanto a consumo energético se refiere, no obstante, en años recientes se informó de un proceso con menor gasto energético, el cual consiste en una sola etapa para la depolimerización de lignocelulosa. Las principales ventajas incluyen un menor tiempo de conversión y mayor uniformidad. Sin embargo, al llevar a cabo el proceso a una temperatura mayor, algunos compuestos de valor aislado suelen verse disminuidos. Otra cuestión es en cuanto al diseño y costos de fabricación de un reactor compatible con sistemas de operación

a altas presiones, además de otros desafíos en cuanto a la optimización del proceso y su escalabilidad industrial [60].

2.7 Aplicaciones de la nanocelulosa.

La nanocelulosa se ha presentado como uno de los materiales más característicos debido a su amplia gama de aplicación, considerado como un material versátil debido a su gran diversidad y biodegradabilidad, estableciéndolo como un excelente candidato en su uso como materia prima en una economía circular explotable.

Su aplicación va desde la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos en aguas remanentes, adsorción de microplásticos y contaminantes emergentes, y remoción de metales pesados y colorantes.

Se ha reportado su uso en la modificación de nanofibras de celulosa con el propósito de adsorber microplásticos. Por otro lado, su implementación como soporte para su funcionalización con nanopartículas metálicas (plata, oro, hierro, entre otras) permiten el aprovechamiento de propiedades como su alta área superficial y capacidad de modificación para distintas aplicaciones. A su vez, es utilizado como material de soporte en la fabricación de membranas nanofibrosas para la inmovilización de bacterias en tratamientos biológicos.

Uno de los campos más interesantes tiene que ver con uso en la aplicación de polímeros para impresión 3D, con el propósito de otorgar una mayor selectividad y afinidad hacia contaminantes precisos, mejorando así su remoción. [61]. Así mismo, se ha estudiado su potencial uso como biochar dopado con nanopartículas metálicas para su desarrollo en filamentos para impresión 3D con efectos de refuerzo y actividad antimicrobiana.

Otro campo emergente tiene que ver con su uso en la ingeniería de tejidos; estudios en conjunto con materiales como los nanotubos de carbono permiten la mejora de propiedades como la adhesión, así como la promoción en el crecimiento de células madre del tejido humano y porcino; dicha aplicación también se centra en la regeneración de otras zonas como el tejido óseo, neural o vascular. Otro aspecto es en relación con el tratamiento de heridas, para los cuales, se han desarrollado materiales compuestos como parches cardíacos o apósitos avanzados para lesiones, con propiedades que estimulan la cicatrización efectiva en coordinación con su efecto

antibacteriano. Por lo que estos tipos de materiales son prometedores en su aplicación para el sector biomédico [62].

2.8 Biocarbón.

El biocarbón puede ser obtenido a través de diferentes tipos de biomasa como, desechos agrícolas, estiércol animal, productos de papel, y últimamente derivado de distintos tipos de residuos orgánicos. El aprovechamiento de estos recursos residuales para la elaboración de biocarbón es una manera eficiente de darles valorización hacia distintos sectores. La producción de este tipo de material varía de acuerdo con la biomasa disponible y distintos factores como, pretratamiento, parámetros (temperatura, tiempo, atmosfera), contenido de humedad del material posterior a la obtención de biocarbón. De los procesos más eficientes para la obtención de este material son, pirólisis (lenta y rápida), carbonización hidrotermal, gasificación parcial [63].

2.9 Propiedades del biocarbón.

Generalmente este tipo de material tiene una composición amorfa compuesta por partículas de distintos tamaños dependientes del tamaño y fuente de la materia prima. Además, otras propiedades a considerar para una óptima calidad y eficiencia del biocarbón son: microporosidad, área superficial, estabilidad térmica y química, alta capacidad de adsorción, entre otros [64].

2.9.1 Microporosidad y mesoporosidad.

Esta propiedad fisicoquímica se asocia con tamaños de poros que varían desde $< 2\text{nm}$ (microporosidad), $2\text{-}50\text{ nm}$ (mesoporosidad), y $>50\text{ nm}$ (macroporosidad). Los microporos son dependientes del aumento de temperatura, lo que deriva en una mayor microporosidad e interacción en el anclaje de nanopartículas [65].

Alcanzar los niveles de micro y mesoporosidad es clave en cuestiones como, establecer una alta área superficial, lograr una capacidad óptima de retención y adsorción o desarrollar una actividad catalítica o redox (mayor cantidad de sitios activos superficiales).

2.9.2 Área superficial.

Conseguir una alta área superficial depende en gran medida del factor de porosidad, es decir que existe una mayor cantidad de espacio en forma de poros, lo que admite una mayor capacidad de adsorción, un mejor soporte para deposición de nanopartículas y mayores sitios activos para

interacciones químicas, permitiendo así, una versatilidad en cuanto a sus interacciones con otras propiedades [66].

2.9.3 Capacidad de adsorción.

A mayor capacidad de adsorción, se requiere una menor cantidad de material para procesos que involucran la retención de moléculas, iones o gases en su superficie, es decir, que moléculas pequeñas pueden esparcirse y fijarse dentro de estos micro o meso poros. Parámetros como, el área superficial y la distribución de poros son clave en la sinergia entre el adsorbato y el carbón [67].

2.10 Métodos de obtención.

El uso de biomasa a partir de desechos provenientes de distintas fuentes para la producción de biocarbón ha sido un tema relevante debido al aprovechamiento del material residual y su posible sostenibilidad al provenir de fuentes naturales. Es por ello, que la necesidad en el desarrollo de metodologías para su fabricación permite evaluar su eficiencia en cuanto a rendimientos, propiedades, aprovechamiento de componentes y velocidades de síntesis [1].

Dentro de los métodos más reportados y prácticos para su fabricación y refinamiento se encuentran los siguientes:

2.10.1 Pirólisis.

Existen dos formatos para llevar a cabo este tipo de síntesis, siendo estas la vía rápida y lenta. La vía rápida consiste en el calentamiento rápido de la biomasa a temperaturas altas $< 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ en periodos cortos, este tipo de proceso maximiza la producción rápida con un rendimiento de alrededor del 50 % en peso. Como resultado se generan productos líquidos (bio-aceites), gaseosos y sólidos (biocarbón), este tipo de procedimiento permite la producción eficiente tanto de carbón activado como de compuestos bio-aceitosos.

En el caso de la pirólisis lenta la biomasa se calienta a temperaturas bajas ($200 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) y periodos de tiempo más largos. Este tipo de método permite la producción de biocarbón en una proporción de obtención mayor con respecto al aceite generado en el proceso. Se suelen utilizar agentes activadores químicos como ZnCl_2 o H_3PO_4 , lo cual maximiza aún más la producción de biocarbón en comparación con el método rápido [68, 69].

2.10.2 Gasificación parcial.

Consiste en un tratamiento posterior a la pirólisis, el cual oxida parcialmente la biomasa a partir de un agente gasificante (como aire, oxígeno o vapor de agua) a una temperatura $<725\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto permite que solo una parte del biocarbón se convierta en gas y el resto permanece como biocarbón. Esto permite otorgar un “refinamiento” a las propiedades del biocarbón generado, como una estructura más porosa y reactiva [70].

2.10.3 Carbonización hidrotermal (HTC).

Se basa en un método espontáneo de materiales a partir de una solución acuosa, donde se controlan aspectos como la temperatura, presión y composición del material. Asimismo, puede verse favorecido en combinación con otras técnicas para mejorar factores que permitan una mejor eficiencia en la creación de nuevos materiales [71] En este caso, permite la transformación de materia prima de origen orgánico en carbono sólido, usualmente conocido como *Biochar*.

Este tipo de síntesis puede ocurrir en un extenso rango de temperaturas, yendo desde la temperatura ambiente hasta otras muy altas. Por otro lado, para controlar la morfología de los materiales se pueden utilizar condiciones de baja o alta presión, permitiendo que los nanomateriales sintetizados tengan una pérdida mínima de material.

2.10.4 Carbonización por microondas.

Su principio fundamental se basa en que combina la carbonización y la activación del material orgánico mediante calentamiento por microondas, esto favorece una atmósfera que permite un calentamiento rápido y uniforme, así como un menor consumo de energía y tiempos.

La carbonización y activación ocurren en un solo paso bajo radiación de microondas. Este tipo de procedimiento suele incluir una serie de etapas sucesivas: secado, calentamiento, desvolatilización, carbonización y activación a distintos rangos de temperatura.

Este tipo de carbonización asistida por radiación de microondas permite la obtención de un biocarbón con mayor área superficial, un mejor refinamiento en la porosidad (micro y meso porosidades más constantes), favoreciendo a su vez mayores capacidades de adsorción y retención de iones. En sí, la radiación por microondas optimiza el proceso de transformación de biomasa en biocarbón activado con un mejor refinamiento en sus propiedades [72].

2.10.5 Activación (física o química).

La activación física se desarrolla como la carbonización del material, para posteriormente someterse a una oxidación parcial (con gases) a altas temperaturas lo cual permite una eficiente porosidad del carbón. Por lo general se realiza mediante dos etapas separadas requiriendo de altas temperaturas. Por otro lado, en la activación química el precursor utilizado es dopado con un agente activador como, KOH, H₃PO₄, ZnCl₂, K₂CO₃ dicho agente reacciona con el material de carbón, permitiendo la liberación de gases durante la reacción, estos a su vez permiten la generación de una estructura porosa en la superficie, este tipo de método utiliza una temperatura y tiempos menores [73].

2.11 Aplicaciones del biocarbón.

Con la creciente necesidad de materiales renovables, sostenibilidad y conservación ambiental, el uso del biocarbón se destaca por su versatilidad y propiedades que varían según la fuente de materia prima y su método de producción, marcando un uso diverso en cuanto a la disposición de sus componentes bioactivos y su sinergia con el biocarbón resultante.

Actualmente, este tipo de material se ha adentrado en distintos campos siendo estudiado en una amplia variedad de dispositivos como, pilas de combustible, supercondensadores o baterías de iones de litio. Su desempeño como superficie porosa para la deposición de nanopartículas y su gran capacidad de adsorción le han permitido una apertura en cuanto a el desarrollo de materiales compuestos con distintos enfoques, siendo los más predominantes la remediación ambiental, actividad biocida y aplicaciones energéticas.

La posibilidad en el ajuste de la estructura y química del biocarbón en el rango nanométrico permite la modificación en sus propiedades, otorgándole características interesantes. A pesar de ello, y de ser considerado uno de los materiales con mayor área de estudio, cuestiones como el deterioro y funcionalidad en distintos campos de aplicación, como el sector agrícola, siguen siendo un impedimento para su máximo aprovechamiento, esto debido a que comportamientos clave como la química y funcionalidad en su superficie pueden verse degradados debido a factores como la oxidación, deterioro microbiano o por efecto de las condiciones ambientales.

El uso e investigación de este material sigue abierto a diversas áreas de estudio, que van desde su refinamiento para un mejor comportamiento en situaciones adversas hasta su sinergia en

nanocompuestos [74]. Dentro de su implementación como soporte para un mejor control y liberación de nanopartículas con efecto antimicrobiano, se ha estudiado su interacción y efectividad a partir de distintas fuentes de materia prima, así como de su variación en la metodología para su obtención y procesos de refinamiento, a su vez se ha estudiado la impregnación de nanopartículas y su comportamiento ante distintos tipos de microorganismos como bacterias, levaduras y contaminantes residuales principalmente. *Deng et al., 2024* elaboraron un catalizador de óxido de plata nanoestructurado cargado en carbono activado poroso para mejorar la activación de H_2O_2 y eliminar bacterias *E. coli* y micropoluentes del agua [75]. *Asheghmoalla & Mehrab Mehrvar, 2024* produjeron carbón activado derivado de carbón vegetal, el cual se utilizó para un estudio en la adsorción de aguas residuales farmacéuticas sintéticas multicomponentes con contenidos de metanol, benceno, cloruro de metileno, 4-aminfenol, entre otros. Alcanzando un porcentaje de efectividad hasta de un 52% en la eliminación de los mencionados componentes [76]. *Chandra Joshi et al., 2022* sintetizaron esferas de carbono dopadas con AgNPs mediante carbonización y activación de resina de plata intercambiadas. Se llegó a observar la eliminación completa para la bacteria *E. coli* y *B. subtilis*, mientras que para *S. aureus* se observó una actividad biocida del 73 % aproximadamente [77].

Como se puede observar la funcionalización del biocarbón a partir de un elemento metálico permite un desempeño óptimo en la eliminación de diversos residuos farmacéuticos. No obstante, el rendimiento en el control de contaminantes de aguas residuales también se ha visto beneficiado, suponiendo un impacto significativo a partir del uso de distintos precursores con respecto al contaminante en cuestión, priorizando un alcance eficiente, así como un alto rango de aplicación. *Medina et al., 2021* a partir de carbón activado comercial desarrollaron catalizadores funcionalizados con nitrato de hierro para evaluar la degradación de fenol en una matriz de agua ultrapura. Obteniendo resultados favorables para su uso en el tratamiento de efluentes de aguas remanentes complejas [78]. Por otro lado, *Shu et al., 2017* desarrollaron carbón activado cargado con cobre a partir de calentamiento por microondas para posteriormente evaluar su efectividad en la eliminación de colorantes industriales (Rhodamine B, MB, Amaranto, rojo Congo y Eosin-Y). Este estudio demostró un aumento en la capacidad de adsorción de hasta un 37.8 % del compuesto, catalogándolo como un potencial adsorbente de contaminantes en soluciones acuosas [79].

Esto no solo permite establecer las diversas aplicaciones del carbón, sino también implementar su uso a partir de fuentes de residuos orgánicos, así como estudiar si existe algún efecto o sinergia en los componentes bioactivos provenientes de la materia prima seleccionada.

2.12 Nanopartículas de plata (AgNPs).

Desde tiempos remotos se tiene registro del efecto positivo producido por la plata metálica en cuanto a la desinfección y control de infecciones, en los últimos años, su derivado de AgNPs ha sido uno de los tópicos más estudiados debido a su amplia gama de aplicación en distintos sectores, debido a sus propiedades como, antibacteriano, antifúngico, antitumoral, entrega de fármacos, biosensores, biocatálisis, entre otros [80]. No obstante, entender el mecanismo antibacteriano de las nanopartículas es esencial para lograr un efecto sinérgico con otros componentes. En el caso de la plata, su efecto bactericida está asociado a la lenta progresión en su oxidación y liberación de iones de Ag^+ al medio. Asimismo, el tamaño nanométrico permite una irrupción eficaz a través de las paredes celulares de patógenos, afectando directamente procesos intracelulares [81].

Su composición, características físicas, químicas y biológicas deriva principalmente de factores como, el tamaño y la estructura de las nanopartículas, por la naturaleza de los materiales con los que interactúa, o bien, por el tipo de síntesis, la cual puede afectar directamente la estabilidad coloidal y, así mismo, la actividad biológica [82]. Este tipo de técnicas incluyen rutas físicas, químicas y biológicas dependiendo del área [83].

2.13 Propiedades fisicoquímicas de las AgNPs.

2.13.1 Morfología y superficie.

En el ámbito de las propiedades fisicoquímicas que respectan a las AgNPs estas determinan su comportamiento, estabilidad, reactividad, entre otros, lo que permite determinar a su vez el enfoque de aplicación y posibles efectos biológicos o ambientales correspondientes. A diferencia de su correspondiente en plata nativa, este tipo de material cuando es llevado a la escala nanométrica se le confieren propiedades importantes debido al tamaño (1-100 nm). El efecto del tamaño es una de las características más importantes, derivado de esta se controlan muchas otras. Esta propiedad repercute directamente en su reactividad, así como en su toxicidad, es decir, entre más pequeñas las partículas suelen ser más reactivas para los microorganismos. Otra propiedad importante tiene que ver con la carga superficial, esta determina su estabilidad coloidal (si las

partículas están dispersas o aglomeradas), si la carga es alta indica estabilidad (repulsión electrostática), por otro lado, si la carga es baja es un indicativo de aglomeración (atracción de Van der Waals). Esta propiedad está relacionada directamente con su comportamiento ante microorganismos y contaminantes [84].

2.13.2 Reactividad.

En cuanto a su eficiente liberación de iones de plata, este representa el mecanismo principal correspondiente a su acción antimicrobiana. Esta propiedad de liberación iónica está fuertemente ligada a cuestiones como el tamaño, pH, tasas de temperatura y la presencia de oxígeno. Asimismo, su excelente actividad catalítica le permite reaccionar de manera eficiente para una gran variedad de reacciones, las cuales incluyen su interacción para la reducción de contaminantes [85].

2.14 Actividad antimicrobiana.

La comprensión de los mecanismos antibacterianos ha demostrado la excelente actividad bactericida de las AgNPs sobre distintos tipos de microorganismos. *Ivask et al., 2013* a exploraron las vías toxicológicas involucradas al exponer 4000 cepas de *Escheria coli* (E. coli) con eliminación de un solo gen a una amplia gama de diferentes tipos de AgNPs, que variaban en su tamaño, carga superficial y ligando de recubrimiento. Descubrieron que las AgNPs exhiben toxicidad específica según la partícula, por otro lado, se pretende que la adhesión de las AgNPs a la pared celular y la membrana, los daños causados a las biomoléculas y estructuras intracelulares por las AgNPs, el estrés oxidativo inducido por los AgNPs y los iones de plata, estén involucrados en las acciones antibacterianas de los AgNPs [86].

El estudio de su actividad antimicrobiana se ha aplicado en un gran número de bacterias exhibiendo inhibiciones notables. *Vanlalveni et al., 2021* describieron estudios emergentes sobre la síntesis de nanopartículas metálicas utilizando extractos de plantas, y su actividad, tomando en cuenta propiedades como la forma y tamaño de las AgNPs biogénicas. Se reportó información acerca de distintos extractos como, *Euphorbia antiquorum*, *Calotropis gigantea*, *extracto de cocoa*, *vaina de Cola nítida* y su actividad contra bacterias humanas patógenas como, *E. coli*, *K. pneumoniae*, *P. mirabilis*, *V. cholera*, *E. faecalis*, *Grampositivas* y *Gramnegativas*, *P. aeruginosa*, *K. granulomatis*, *A. niger*. También describieron los efectos por parte del tamaño y la forma de las

AgNPs, mencionaron que a menor tamaño de nanopartícula y una forma asociada a la esférica, incrementa la actividad antimicrobiana [87].

Por otro lado, *Pernas-Pleite et al., 2025* reportaron resultados favorables a partir de un estudio sobre las AgNPs en solitario y en combinación con antibióticos clásicos contra bacterias más resistentes. Se probó el conjunto de distintos tipos de antibióticos clásicos con AgNPs, obteniendo inhibición en cepas resistentes a antibióticos en solitario; la combinación de AgNPs con estreptomicina inhibió *Staphylococcus epidermidis* resistente; así como su combinación con colistina fue eficaz contra *Staphylococcus aureus* resistente [88].

La mayoría de los reportes relacionan la efectividad biocida de las AgNPs con su tamaño nanométrico, que permite una mejor adhesión a la pared celular bacteriana, produciendo daño en la membrana y la consiguiente muerte bacteriana. Así mismo, esto repercute en la liberación controlada de iones lo que sería otro factor clave en su acción biocida. A su vez, también han demostrado una eficiente actividad antioxidante como antiinflamatoria, lo que los hace factibles para aplicaciones en biomedicina.

Esto demuestra la enorme capacidad y sinergia que tienen las AgNPs para su implementación en aplicaciones multifuncionales potenciales como, terapias antibióticas, productos biomédicos, medicamentos, industria de pinturas, agentes para protección de cultivos, productos cosméticos y de higiene personal [89].

2.15 Aplicaciones de sistemas híbridos de nanopartículas de plata.

Existen diversos estudios propuestos que comparten la relación y efectividad en cuanto al uso de AgNPs en sinergia con otros componentes como el biochar o la nanocelulosa. Si bien, como se puede notar, su efectividad depende en gran medida del tamaño, la implementación de materiales de refuerzo que se desempeñen como soporte, benefician aún más su interacción y liberación, prolongando y distribuyendo de una manera más eficiente su comportamiento antimicrobiano. Además, cuestiones como la adversidad en condiciones reales sigue siendo un factor clave a sobrellevar, los ajustes y avances en este tipo de tecnologías nos permiten establecer cada vez más un estándar en un determinado número de aplicaciones. Por otro lado, esto también abre nuevas oportunidades al uso de materia prima proveniente de fuentes naturales o en su defecto al aprovechamiento de residuos por parte de distintos sectores. Así mismo, su estudio con relación al

comportamiento de sus componentes bioactivos también podría jugar un papel clave otorgándole o potenciando sus propiedades.

Se tienen registros sobre el efecto sinérgico en el uso de biocarbón y AgNPs, demostrando una actividad más eficaz en la inhibición de bacterias. *Pratama Jujur Wibawa et al., 2021* reportaron la síntesis verde de AgNPs a partir de aloe vera y su mejora en la actividad antimicrobiana al inmovilizarlas sobre nanopartículas de carbono activado, mostrando una mejora en la inhibición de bacterias *Gramnegativas (E. coli)* y *Grampositivas (S. aureus)*, a su vez, demostraron su aplicación en textiles y como dependiendo del tipo de tela puede llegar a cambiar la actividad antimicrobiana [90]. *Zhao et al., 2025* fabricaron un papel que incorpora AgNPs encapsuladas dentro de esferas de carbono inmovilizadas dentro de nanocristales de celulosa. Esto permitió una liberación lenta y controlada de los iones de plata, otorgándole al papel buenas propiedades antimicrobianas aparentes contra bacterias *E. coli* y *S. aureus*, sin afectar la viabilidad celular, lo que exhibe una buena biocompatibilidad. A su vez, el papel demostró una mejoría en sus propiedades mecánicas haciéndolo más duradero. Por lo que cuestiones como su actividad biocida y duración lo hacen un candidato ideal para aplicaciones de embalaje [15]. *Gonçalves et al., 2016* fabricaron carbón activado funcionalizado con AgNPs a partir de bagazo de caña de azúcar mediante un proceso de pirolisis, mostrando una actividad de inhibición en el crecimiento de *E. coli*, a pesar de ello, también se declararon cuestiones como la necesidad de análisis fisicoquímicos con pruebas biológicas para evaluar su ecotoxicidad, promoviendo así una producción segura que no dañe al medio ambiente [16].

El conjunto de propiedades exhibidas por estos tres componentes, demuestran fuertemente factores clave como lo son, el aprovechamiento de residuos y su uso efectivo para la generación de productos escalables, el beneficio por parte de las propiedades de cada componente, desde su tamaño nanométrico hasta la sinergia en los componentes bioactivos de las fuentes, la posibilidad en la potenciación de propiedades que permitan un mejor desempeño en problemáticas emergentes en cuanto a remediación de contaminantes y su posible uso en sectores como el biomédico, industrial, entre otros.

Si bien, la idea en cuanto a la gama de aplicaciones es un concepto atractivo, se deben considerar cuestiones en cuanto a la nano toxicidad del compuesto elaborado, evaluando tanto su efectividad, implementación y como futuro deshecho y que impactos puede tener.

2.16 Hipótesis.

Se espera que, a partir de las condiciones experimentales propuestas, se obtenga nanocelulosa de la pared celular del alga sargazo, así como su funcionalización con nanopartículas de Ag para la obtención de un nanocompuesto con propiedades antimicrobianas.

2.17 Objetivos.

2.17.1 Objetivo general.

1. Optimización en el proceso de tratamiento y extracción de nanocelulosa laminar (NLC) a partir del alga *Sargassum spp.* y su funcionalización mediante pirólisis con nanopartículas de plata (AgNPs) para la elaboración de un nanocompuesto de biocarbón dopado con nanopartículas de plata (AgNPs/CAS) con potencial actividad antimicrobiana.

2.17.2 Objetivos específicos.

1. Optimizar las condiciones y recursos en el procedimiento de hidrólisis ácida, así como evaluar el efecto de diferentes concentraciones de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno para la extracción de nanocelulosa cristalina a partir del alga sargazo.
2. Elaborar películas transparentes a partir de los nanocelulosa laminar extraída.
3. Deposición de nanopartículas de plata (AgNPs) sobre una matriz de nanocelulosa laminar mediante descomposición térmica.
4. Caracterizar las propiedades físicas y químicas de la película de nanocelulosa cristalina y del nanocompuesto AgNPs/CAS mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía confocal de barrido láser (LSM), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopia por resonancia magnética nuclear (NMR) y un analizador de humedad.
5. Evaluar los efectos bactericidas del nanocompuesto AgNPs/CAS a partir de cultivos bacterianos y levaduras.

Capítulo 3.

Metodología.

3.1 Aislamiento de nanocelulosa laminar.

La presente investigación se llevará a cabo a partir de un análisis comparativo, en el cual se analizarán estudios anteriores sobre la extracción de nanocelulosa cristalina a partir de algas principalmente afines al sargazo o de algas similares, buscando comparar los métodos de obtención de nanocelulosa cristalina con el propuesto durante esta investigación.

Para la obtención de nanocelulosa laminar (NLC), se recolectó y trasladó el sargazo desde la costa de Puerto Morelos, Quintana Roo, donde se le removieron contaminantes, como arena y residuos marinos. A través de una trituradora de baja potencia se fracturó el alga, y seguidamente se usó un tamiz (#25) para separarla. Posteriormente, el material de sargazo se pulverizó en un molinillo de alta potencia para obtener un polvo fino, el cual se almacenó en tubos Falcon para su posterior experimentación.

Se extrajo el componente de fucoidan a partir del alga de sargazo anteriormente tratada, con el propósito de que no influya en la pureza de la nanocelulosa cristalina. Para lo cual, se colocaron 5 g de sargazo en un frasco de vidrio con 100 mL de agua. Posteriormente, se colocó dicho frasco en baño maría y se sometió a 80°C durante una hora en constante agitación a 350 RPM. Subsecuentemente, se filtró la muestra al vacío y se aisló la biomasa de sargazo del fucoidan.

La biomasa de sargazo resultante se secó e introdujo en una solución de 40 mL de H₂O₂ (30%) con agitación de 350 RPM a 80 °C en baño maría. Pasada una hora, se espera un cambio de color en la muestra, lo cual es indicativo de la eliminación de pigmentos naturales de la biomasa original. Posteriormente, se añadió una solución que contenía 9 mL de H₂O₂ (30%) y 1 mL de ácido concentrado (H₂SO₄ – 97.7 %) y se agitó durante 30 minutos antes de ser transferida a una autoclave a 110 °C y 10 psi durante 45 minutos (5 g en 50 mL o 1/10 w/v). Finalizado el proceso en la autoclave, la muestra se agitó durante 1 h, seguida de centrifugación, resuspensión y neutralización utilizando pellets de NaOH (97%). Se realizó una serie de lavados para eliminar

impurezas residuales. La solución resultante se dializó durante 36 horas para eliminar sales y contaminantes restantes. Finalmente, el producto se resuspendió y centrifugó, obteniendo un gel que se transfirió a una placa Petri. El gel se secó por evaporación (40 °C) para formar una película.

3.2 Pirólisis rápida y síntesis de nanocompuesto

A partir del material de nanocelulosa y el material de sargazo crudo, se preparó biocarbón impregnado con nanopartículas metálicas (AgNPs/NLC y AgNPs/CAS). Para el desarrollo de ambos compuestos, se elaboró una solución de 50 mL de agua desionizada con un agregado de 0.5 g de precursor de AgNO₃ para el compuesto de AgNPs/CAS y AgNPs/NLC, los cuales se dejaron en agitación a 350 RPM durante 10 min. En la **Figura 3.1** se muestra un resumen general del setup experimental para el proceso de pirólisis rápida.

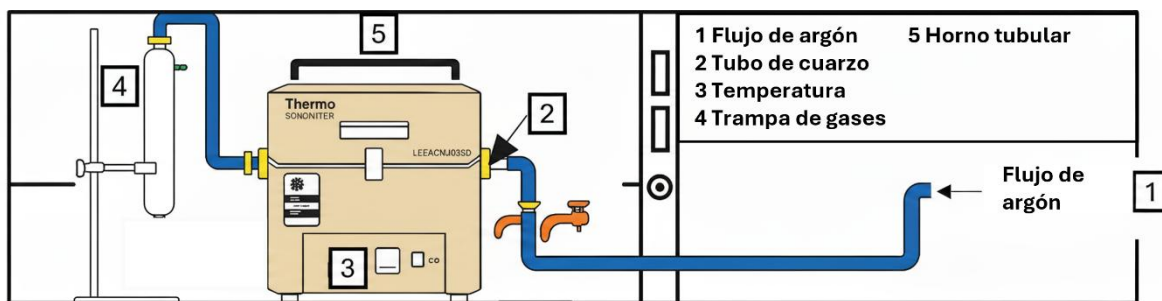


Figura 3.1 Esquema del reactor empleado para realizar el procedimiento de pirólisis.

Posteriormente, cada muestra se centrifugó para retirar el exceso de humedad, y ambas muestras por separado se colocaron en un tubo de cuarzo en un sistema cerrado con flujo constante de gas argón (atmósfera controlada) y una trampa de gases; se colocó el tubo con la muestra en un horno tubular previamente calentado a 600 °C, y se dejó por 10 minutos alcanzada la temperatura nuevamente. Esta temperatura fue seleccionada en base a pruebas preliminares de carbonización.

Posteriormente, el material carbonizado resultante se retiró del tubo de cuarzo transcurridas dos horas, se lavó con agua desionizada, para finalmente centrifugarlo y guardarlo en tubos Falcon para su posterior análisis. En la **Figura 3.2** se muestra un setup del proceso de pirólisis rápida.

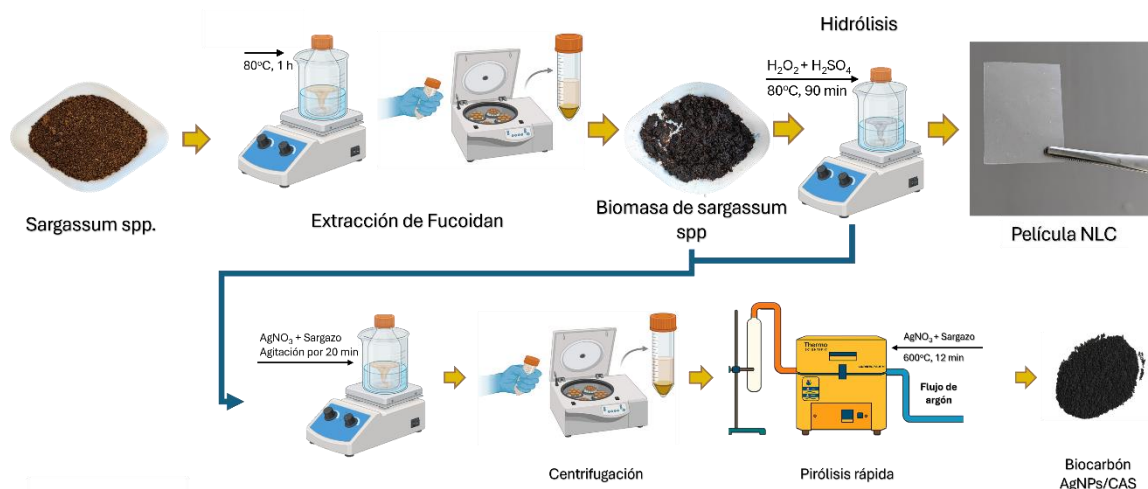


Figura 3.2 Procedimiento experimental del aislamiento de nanocelulosa laminar y preparación de biocarbón impregnado con nanopartículas metálicas (AgNPs/CAS) a partir del alga *Sargassum spp.*

3.3 Estudio de la actividad antimicrobiana del nanocompuesto AgNPs/CAS.

Para evaluar el nanocompuesto AgNPs/CAS en cuanto a su actividad antimicrobiana, se prepararon medios de cultivo en agar (bacterias) y PDA (levadura) expuestas a determinadas concentraciones del nanocompuesto AgNPs/CAS para posteriormente realizar la inoculación de las bacterias *E. coli*, *S. aureus* y la levadura *C. albicans* en el cultivo. Finalmente se midió el radio de inhibición (mm) para cada prueba.

3.4 Análisis de rendimiento en la valorización de biomasa de Sargassum spp.

Para la determinación del rendimiento de los componentes y materiales de la biomasa de *Sargassum spp.*, se realizaron análisis de contenido de humedad a partir del material recolectado.

La biomasa cruda de sargazo fue rehidratada y analizada mediante un **Shimadzu MOC63u Moisture Analyzer**, el cual emplea un sistema de secado por calentamiento a 48°C para determinar de manera controlada el porcentaje de pérdida de contenido humedad respecto al peso inicial de la muestra.

En el caso del componente *Fucoidan*, la biomasa fue sometida a un tratamiento térmico sencillo que permitió la separación de la fracción sólida (biomasa precipitada) del sobrenadante que contenía el polisacárido sulfatado. Este procedimiento se repitió en dos ocasiones con el fin de

favorecer la recuperación del componente. Posteriormente, el sobrenadante fue secado en un horno a 45 °C durante 24 horas y el material obtenido fue pulverizado en un mortero hasta obtener un polvo fino. Finalmente, el producto fue pesado con el objetivo de estimar el rendimiento del componente aislado.

Con respecto al material de nanocelulosa su rendimiento fue evaluado a partir del material en suspensión obtenido del proceso de hidrólisis, el cual fue secado en un horno bajo las mismas condiciones que el componente de *Furoidan*, posteriormente se pesó y determino su rendimiento de contenido de humedad.

Para los materiales de biocarbón obtenidos, su rendimiento se evaluó con respecto al proceso de pirolizado propuesto, en donde se pesó tanto la biomasa inicial de nanocelulosa, así como del material de sargazo, y el peso final de ambos después del procedimiento de pirólisis.

La determinación del contenido de humedad permitió establecer una referencia cuantitativa del rendimiento de la biomasa de *Sargassum* spp. y de los componentes/materiales obtenidos durante las distintas etapas de su procesamiento. Este análisis permite establecer una mejora en el control sobre el manejo y secado del material, promoviendo una mayor eficiencia en su reproducibilidad.

3.5 Caracterización.

La caracterización de las muestras de sargazo, nanocelulosa y el nanocompuesto AgNPs/CAS para analizar y determinar sus propiedades físicas y químicas se llevará a cabo mediante las técnicas de SEM, LSM, FTIR, TGA, NMR y un analizador de humedad. Existen diversas técnicas de espectroscopia y microscopia, que nos permiten la caracterización de materiales a nanoescala, logrando un análisis específico en estructura, composición y morfología.

El campo de la espectroscopia es considerado una de las herramientas analíticas más útiles para el estudio en la composición de materiales. Su versatilidad y ventajas como método no destructivo y rápido, lo hacen una de las opciones óptimas. Esta rama analiza el comportamiento entre la radiación electromagnética y la materia, analizando como un objeto absorbe, refleja o emite luz en diferentes longitudes de onda (λ), permitiendo determinar las propiedades físicas, químicas y estructurales de la muestra a estudiar. Estos análisis son presentados en forma de gráfico o espectros de energía emitida o absorbida frente a la frecuencia de esta energía o longitud de onda de la radiación.

La interpretación de los espectros (**Figura 3.3**) proporciona información fundamental sobre los niveles atómicos y moleculares, geometría molécula, enlaces químicos y los mecanismos de las reacciones químicas [91].

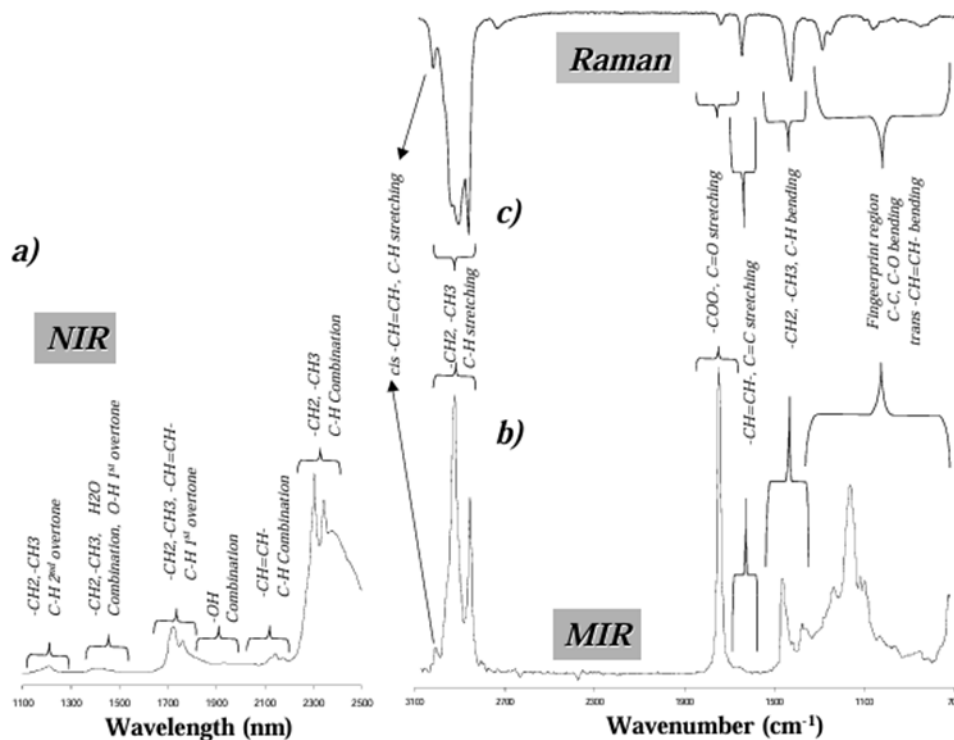


Figura 3.3 Grupos funcionales, estiramientos y flexiones a partir de las técnicas espectroscópicas de infrarrojo cercano (a), infrarrojo medio (b) y RAMAN (c). Tomado de (Baeten & Dardenne, 2002).

Por otro lado, el área de la microscopia nos permite analizar tanto la morfología, así como propiedades físicas y químicas de los materiales a estudiar. Técnicas como la microscopia óptica han permitido la observación e interpretación de fenómenos a una escala pequeña a partir de la luz visible, demostrando la interacción entre fotones y como estos a su vez nos permiten apreciar fenomenología y comportamientos complejos en diversas estructuras de los materiales. Así mismo, técnicas más sofisticadas como, la microscopia electrónica de barrido (SEM) y microscopia electrónica de transmisión (TEM) (**Figura 3.4**), permiten la creación de imágenes detalladas de la superficie de un material mediante un haz de electrones, proporcionando una alta resolución en la morfología de los materiales estudiados [92].



Figura 3.1 Microscopio electrónico de transmisión (izquierda) y microscopio electrónico de barrido (derecha).

3.5.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La morfología de la muestra de la película de nanocelulosa se analizó utilizando un microscopio electrónico de barrido Hitachi SU8020 (**Figura 3.5**) con una aceleración de bajo voltaje de 5,00 kV, un aumento de 40.0 k y 70.0 k y una distancia de trabajo de 8.5 mm. Así mismo, la muestra fue recubierta con una capa de oro para su óptima detección.

3.5.2 Microscopio confocal de barrido láser (LSM)

Se depositó una gota de la suspensión de nanocelulosa sobre una oblea de silicio y se dejó secando a 40 °C durante 30 minutos. Se utilizó un microscopio de escaneo láser (confocal) para obtener perfiles de altura con un ZEISS LSM 700, con el fin de estudiar la topografía superficial y grosor de la muestra con un láser que emite a 405 nm, utilizando 150 capas y 512x512 píxeles para construir cada imagen.

3.5.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).

Las muestras de nanocelulosa, sargazo seco y limpio, carbón crudo y los nanocompuestos AgNPs/CANC y AgNPs/CAS se caracterizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrofotómetro compacto IRAffinity-1 operado en modo de reflectancia total atenuada (ATR). Los espectros se obtuvieron en un intervalo de 500 a 4000 cm^{-1} , con una resolución espectral de 4 cm^{-1} y un total de 25 barridos por muestra. Las mediciones se realizaron empleando un cristal ATR de diamante.

3.5.4 Analizador de humedad.

El volumen de humedad de las muestras de sargazo se determinó mediante un analizador de humedad por secado de halógeno Shimadzu MOC63u, el cual opera bajo el principio termogravimétrico con un rango de temperatura de 50 a 200 grados Celsius y una legibilidad de 0.02 g. En este caso se establecieron condiciones a 48 °C por 30 minutos.

3.5.5 Análisis termogravimétrico (TGA).

La caracterización de las muestras de *Sargassum* spp. (**4.8363 mg**), *Sargassum* spp. limpio (**4.3868 mg**) y el material de biocarbón AgNPs/CAS (**1.8741 mg**) se realizó mediante un equipo de análisis termogravimétrico en un rango de temperaturas desde el ambiental hasta los 700 °C en una atmósfera controlada de nitrógeno a una rampa de 10 °C/min, con el propósito de recabar datos de curvas TGA y DTG.

3.5.6 Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (NMR).

La caracterización del sargazo, el biocarbón de control y el biocarbón AgNPs/AC se llevó a cabo mediante resonancia magnética nuclear de estado sólido de ^{13}C (RMN ^{13}C) a temperatura ambiente (23 °C), utilizando un espectrómetro Bruker de 500 MHz modelo Avance III equipado con una sonda de estado sólido que opera en el ángulo mágico (MAS). Para los análisis se emplearon rotores de circonio de 4 mm con tapas de turbina Kel-F. Los experimentos de polarización cruzada ^{13}C se adquirieron a una frecuencia de 125.55 MHz, utilizando un retraso de relajación (D1) de 4 ms y un tiempo de contacto de 2.82 ms.

3.6 Estudio de la actividad antimicrobiana del nanocompuesto AgNPs/CAS.

Se llevaron a cabo pruebas de actividad antimicrobiana para el nanocompuesto AgNPs/CAS. Para ello, se prepararon medios de cultivo de agar bacteriológico/caldo Mueller Hinton para el crecimiento de bacterias y Potato Dextrose Agar (PDA) para el crecimiento de la levadura. Posteriormente, se inocularon muestras de cepas bacterianas de *E. coli* y *S. aureus*, así como cepas de la levadura *C. albicans*, las cuales fueron expuestas al nanocompuesto AgNPs/CAS a través de método por contacto, para seguidamente pasarlas a una incubadora Lab-Line Imperial III durante 24 h a 37 °C con el propósito de mantener condiciones de atmósfera óptimas para el crecimiento de los cultivos. Finalmente, se observó y midió la zona de inhibición por parte del nanocompuesto.

Capítulo 4.

Resultados y discusiones.

4.1 Eficiencia de componentes.

A partir de la metodología planteada, se elaboraron una serie de análisis para determinar la eficiencia del *Sargassum spp.* y sus componentes aislados extraídos mediante un analizador de humedad *Shimadzu MOC63u* y secado por evaporación en un horno. Esto con el propósito de comparar el rendimiento con respecto a investigaciones anteriores y establecer un estándar óptimo.

4.1.1 Rendimiento del alga *Sargassum spp.*

Los porcentajes en la pérdida de volumen de humedad para el alga *Sargassum spp.* fueron realizados a partir de la recolección y secado del alga al aire libre por 2 días, seguido de un pretratamiento en el cual se removieron restos de arena y materiales marinos correspondientes a la zona. Finalmente, el alga se rehidrato y sometió a una prueba de pérdida de volumen de humedad en un analizador de humedad *Shimadzu MOC63u*, el cual, mediante secado por calor (48 °C), permitió determinar de una manera controlada y precisa la pérdida en el porcentaje de peso de la muestra inicial.

Tabla 4.1 Análisis en la pérdida de volumen de humedad del alga *Sargassum spp.*

Biomasa de sargazo seca				
Muestra	Peso inicial de sargazo húmedo (g)	Perdida de contenido de humedad (%)	Peso final de sargazo seco (g)	Porcentaje de sargazo seco (%)
1	3.257	71.97	0.910	27.93
2	3.253	71.17	0.938	28.83
3	3.270	70.17	0.975	29.81

Rendimiento promedio
El análisis por triplicado mostró que el rendimiento de biomasa de sargazo fue en promedio del 28.85% a partir de su valor en seco con respecto a la biomasa húmeda hidratada inicial.

En la **Tabla 4.1** se muestran los datos recolectados, los cuales se sitúan en un promedio de pérdida de volumen de humedad del **71.10 %** y de **28.85 %** para la biomasa seca de *Sargassum spp.* De acuerdo con investigaciones anteriores, *S Winarni et al., 2021 [99]* registraron un volumen en la pérdida de humedad del 67.281% a partir de un secado por horno con un rango de temperatura de 20-220 °C (sin mención de temperatura específica) para *Sargassum spp.* Por otro lado, investigaciones por parte de *López-Sosa et al., 2020 [36]* definieron una pérdida de volumen de humedad correspondiente al 80% a partir de un secado inicial al aire libre bajo irradiación solar natural (25 °C) durante 5 días, seguido de un secado por evaporación en un horno a 115 °C, situando el 20% restante como material seco.

Teniendo esto en cuenta, se demuestra que, dependiendo del método de secado empleado, ya sea, natural o bajo algún sistema especializado, temperatura y tiempos de exposición, se afecta la variabilidad en cuanto al porcentaje de pérdida de contenido de humedad. Con el propósito de establecer una referencia composicional de la biomasa inicial, estudios previos de caracterización para análisis elemental del alga *Sargassum spp.* indican contenidos aproximados de carbono de aproximadamente 30 – 34 %, hidrogeno entre 4 – 6 %, nitrógeno 1 -2 % y fracciones menores de sulfatos y minerales marinos (menor al 1 %). Esto permite establecer una base para evaluar las transformaciones químicas que ocurren durante los procesos de secado en el tratamiento de la biomasa, lo que podría influir en la estabilidad de ciertos componentes bioactivos presentes en la biomasa.

En adición, la variación de porcentajes puede deberse a cuestiones como la sección del alga tomada, que, a pesar de no representar un cambio abrupto, permite plantear que existen zonas que tienden a una mayor absorción, y por lo tanto una mayor pérdida de contenido de humedad, derivando en secciones más ligeras. Este análisis permite establecer mejores parámetros en cuanto

a control sobre el contenido de humedad inicial de la biomasa, lo cual es relevante para asegurar la reproducibilidad en procesos de transformación y aprovechamiento del sargazo como materia prima [100].

4.1.2 Rendimiento del componente aislado de Fucoidan.

Se estudiaron los porcentajes en la pérdida de contenido de humedad para el compuesto aislado asociado con la posible presencia de *Fucoidan* (polisacárido sulfatado característico de este tipo de alga). La presencia de este componente se aprecia más adelante mediante un análisis a partir de espectroscopia FTIR, donde se muestran bandas características asociadas a grupos sulfatos (S=O) y enlaces glicosídicos propios de polisacáridos sulfatados. A continuación, en la **Tabla 4.2** se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 4.2 Rendimiento de Fucoïdan extraído de la biomasa de *Sargassum* spp.

Fucoïdan					
Muestra	Peso inicial de sargazo (g)	Primera extracción de fucoïdan (g)	Segunda extracción de fucoïdan (g)	Peso final de fucoïdan (g)	Porcentaje de fucoïdan (%)
1	60	3.2	2.18	5.38	8.96
2	10	0.48	0.31	0.79	7.9
3	10	0.54	0.36	0.9	9
Rendimiento promedio					
El análisis por triplicado a diferentes pesos mostro que el rendimiento de <i>fucoïdan</i> en promedio fue del 8.62% a partir del tratamiento térmico aplicado.					

En la **Tabla 4.2** se muestran los resultados obtenidos, los cuales se sitúan en un promedio de perdida de volumen de humedad del **91.38 %**, y del **8.62 %** para la muestra seca de *Fucoïdan*. Estos resultados se sitúan dentro del estándar promedio de acuerdo con distintas investigaciones anteriores. *Yolanda et al., 2024* [101] reportaron un contenido de fucoïdan situado en un intervalo de 6.3 a 9.1 % con respecto a la evaluación de diferentes especies invasoras (*S. natans I*, *S. Fluitans* y *S. natans VIII*) de la zona del Caribe mediante métodos de extracción por ácidos. *Paredes-Camacho et al., 2023* [1] extrajeron compuestos bioactivos a través de un proceso llamado fermentación en medios líquidos a partir de una cepa *Aspergillus Níger*, donde se obtuvieron porcentajes entre el 7.09 – 7.18 % de Fucoïdan. Por otro lado, *Subramanian Palanisamy et al., 2017* [102] reportaron un rendimiento total de *Fucoïdan* situado en 4.51 ± 0.24 a partir de *Sargassum polycystum*.

Los datos recolectados en este estudio son consistentes con el estándar de investigaciones anteriores, situando al método utilizado como una forma eficiente en la extracción de este componente de *Fucoïdan* crudo. En adición a esto, la extracción de este componente nos permitió tener un mejor control en cuanto a la calidad y pureza en el proceso siguiente de extracción de

nanocelulosa laminar.

4.1.3 Rendimiento de nanocelulosa laminar.

A partir de la metodología propuesta para la extracción de nanocelulosa, se realizó un análisis para determinar su eficiencia en la muestra, de la cual se obtuvieron los siguientes resultados. En la **Tabla 4.3** se muestran los resultados obtenidos, los cuales se sitúan en un promedio de pérdida de volumen de humedad del **87.8 %**, y del **12.2 %** para la muestra seca de nanocelulosa. El porcentaje obtenido se sitúa dentro del estándar promedio de acuerdo con distintas investigaciones en cuanto a extracción de nanocelulosa a partir de algas pardas. *Salem & Ismail, 2022* [103] reportaron variaciones de entre 9.13 – 47.74 % a partir del estudio de diferentes clases y especies de algas marinas. En el caso de las algas pardas de la clase *Phaeophyta* se obtuvieron rendimientos aproximados del 9.13 ± 0.16 para la especie *Colpomenia sinuosa* y se menciona que para la especie *P. pavonica* fue del 14.09 %. Por otro lado, *L. Chávez-Guerrero et al., 2021* [21] obtuvieron un rendimiento del 14.9 %, se sugiere que este porcentaje es debido a la falta de pretratamiento del alga, por lo cual, es posible que exista contenido no celulósico.

Tabla 4.3 Rendimiento de la nanocelulosa extraída a partir de la biomasa de sargazo.

Nanocelulosa laminar				
Muestra	Peso inicial de sargazo (g)	Perdida de volumen de humedad de nanocelulosa (%)	Peso final de nanocelulosa (g)	Porcentaje de nanocelulosa (%)
1	5	89.9	0.54	10.8
2	5	86.4	0.68	13.6
Rendimiento promedio				
El análisis por duplicado mostro que el rendimiento de nanocelulosa en promedio fue del 12.2% a partir del tratamiento de hidrólisis aplicado.				

Estos resultados nos permiten evaluar su aprovechamiento con respecto a otras algas, situando a este tipo de metodología como una opción favorable con respecto al control en el uso de reactivos, temperaturas, tiempos de reacción y una disminución en los procesos para su obtención. Si bien, la mayoría de los tratamientos involucran el uso de hidrólisis ácida, los procesos suelen incluir tratamientos demasiado agresivos y poco amigables, los cuales incluyen reactivos como HCl, NaClO₂, KOH, ClO₂ [104 – 106]. Por lo que la eficiencia en el tratamiento establecido en este trabajo en cuanto a grados de calidad y controles óptimos puede promover un estándar de metodología escalable.

4.1.4 Rendimiento del biocarbón AgNPs/CAS.

Se realizó un estudio para determinar el rendimiento del biocarbón AgNPs/CAS obtenido a partir de la biomasa de sargazo seca. Dicho análisis se realizó por triplicado a partir del procedimiento de pirólisis rápida anteriormente planteado en la metodología. Del cual se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la **Tabla 4.4**, donde se muestran los resultados por triplicado obtenidos, los cuales están relacionados al contenido estándar de carbón activado a partir de

distintas fuentes. *Aravindhan et al., 2009* [107] reportaron un rendimiento de carbón fijo del 34.45 % y un contenido de ceniza del 6.30 % mediante pirólisis rápida a partir del contenido de las algas *S. longifolium* (SL) y *H. Valentiae* (HV). *Solís-Fuentes et al., 2025* [108] estudiaron el rendimiento de carbón activado con respecto a otros tipos de fuentes como cascara de naranja del 18.34 %, cascarilla de café del 17.01 % y bagazo de caña del 26.31 %. Esto demuestra el potencial del alga *Sargassum* spp. como materia prima en la producción de biocarbón crudo.

Tabla 4.4 Análisis del rendimiento de biocarbón AgNPs/CAS a partir de biomasa de *Sargassum* spp.

Carbón a partir de biomasa de sargazo seca				
Muestra	Peso inicial de sargazo (g)	Perdida de volumen por pirólisis rápida (%)	Peso de biocarbón (g)	Porcentaje de biocarbón (%)
1	5	75.6	1.22	24.4
2	5	74.6	1.27	25.4
3	5	73.8	1.31	26.2
Rendimiento promedio				
El análisis por triplicado mostro que el rendimiento de <i>carbón</i> en promedio fue del 25.33 % a partir del tratamiento por descomposición térmica aplicado.				

4.1.5 Rendimiento del biocarbón AgNPs/NLC.

Similarmente, se realizó un análisis para determinar el rendimiento del carbón derivado de la nanocelulosa laminar, el cual también, se llevó a cabo mediante un proceso de pirólisis rápida. En la **Tabla 4.5** se muestra un duplicado realizado a la nanocelulosa laminar extraída, la cual se sitúa en un promedio de perdida de volumen de humedad del 94.8 % y del 42.6 % para la muestra de biocarbón. En estos resultados se puede observar lo anteriormente mencionado, en donde es

redituable si la nanocelulosa fuese el material de partida, pero no si se toma desde el material de sargazo crudo.

Como se estimó anteriormente, la eficiencia del componente de nanocelulosa está situado en un promedio de 12.2 %, si consideramos este porcentaje como factor inicial y partimos de un valor de 10 g de sargazo seco, nos encontraríamos con un valor aproximado de 1.22 g de nanocelulosa seca, la cual sería nuestra base correspondiente a la obtención de carbón activado a partir del componente de nanocelulosa. No obstante, a pesar de que en términos de obtención a partir de nanocelulosa sería eficiente, no es redituable si se considera a partir de la biomasa de sargazo crudo.

Tabla 4.5 Análisis del rendimiento de biocarbón a partir de nanocelulosa laminar.

Biocarbón AgNPs/NLC a partir de nanocelulosa					
Muestra	Peso inicial de nanocelulosa húmeda (g)	Peso estimado de nanocelulosa seca (g)	Perdida de volumen de humedad (%)	Peso final de carbón (g)	Carbón con respecto a nanocelulosa seca (%)
1	10	1.22	93.9	0.61	50
2	10	1.22	95.7	0.43	35.2
Rendimiento promedio					
El análisis por duplicado mostro que el rendimiento de <i>carbón</i> en promedio fue del 42.6% a partir del tratamiento por pirólisis rápida aplicado, no obstante, existe una pronunciada variación, que puede verse alterada de acuerdo con la sección del alga hidrolizada.					

4.2 Análisis SEM.

El aislamiento de nanocelulosa representa un interés por la fabricación de materiales de alto impacto a partir del aprovechamiento de residuos de sargazo. En este estudio se obtuvieron porcentajes de extracción prometedores, así como un rendimiento adecuado en cuanto a la calidad y propiedades fisicoquímicas del material resultante, mostrando niveles de pureza y transparencia aparentes, sin la necesidad de ácidos agresivos o extensos lavados para eliminar impurezas. Las condiciones del proceso de hidrólisis fueron establecidas a 110 °C y 10 psi, esto con el objetivo de favorecer la descomposición parcial de los componentes amorfos presentes en la biomasa de

sargazo, permitiendo así la liberación de secciones solubles y la consiguiente obtención del material de nanocelulosa. El ajuste de estos parámetros se evaluó de manera indirecta mediante el análisis pH del proceso tanto antes como después del tratamiento, así como su caracterización correspondiente. En particular, los cambios observados en los grupos mediante FTIR permitieron observar la presencia de las bandas características de la nanocelulosa, así como la reducción de señales asociadas a componentes amorfos de la biomasa, lo cual sugiere que las condiciones empleadas fueron eficientes para promover la hidrólisis parcial del material sin comprometer su estructura principal. Estos resultados permiten sustentar que los parámetros de temperatura y presión utilizados favorecen la obtención de un material estable para las etapas posteriores del proceso.

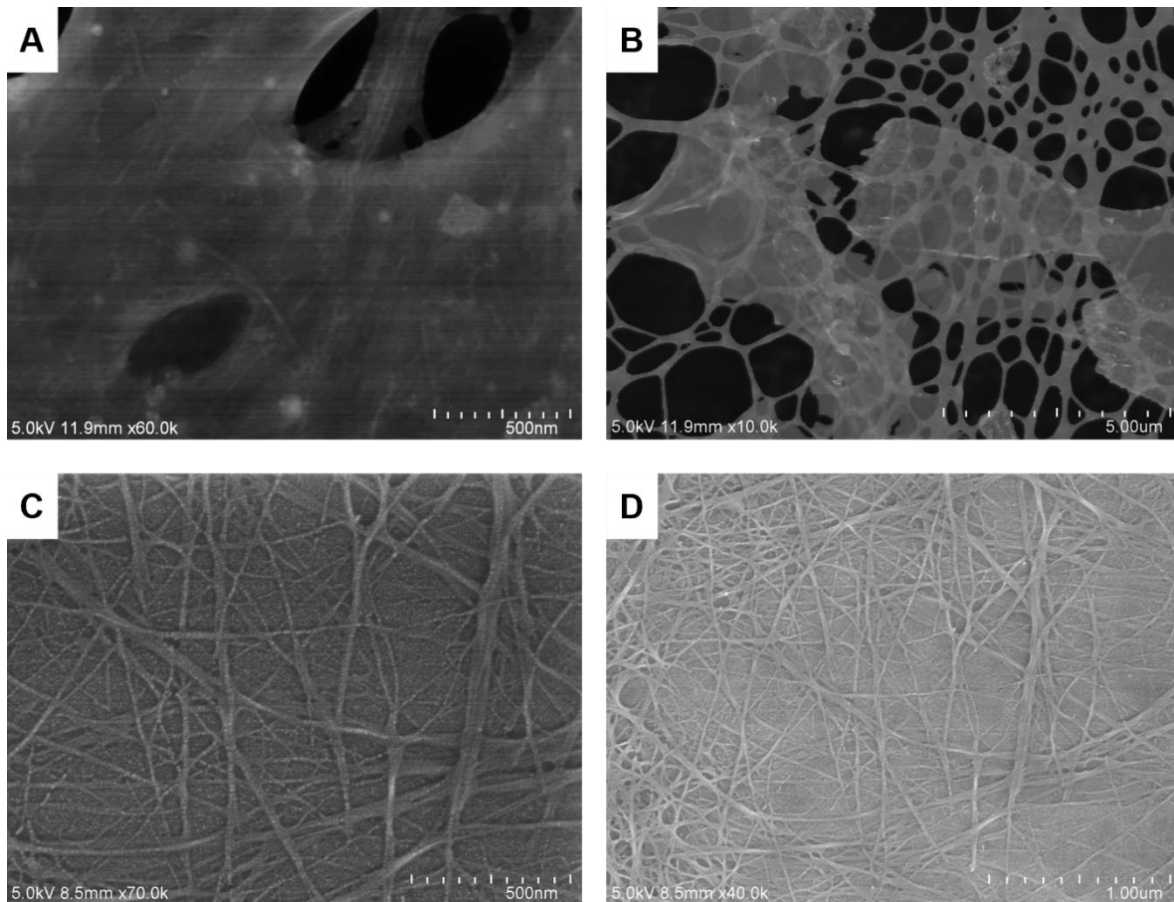


Figura 4.1 Micrografías SEM de una película de nanocelulosa 2D a diferentes magnificaciones.

Las micrografías de la estructura nanométrica de celulosa se presentan en la **Figura 4.1**, donde estas permiten observar la formación de una red laminar (**A y B**) a partir de fibras delgadas y entrelazadas (**C y D**) con una distribución de tamaños entre 5-45 nm de diámetro aparente (**Figura 4.2**). Así mismo, se puede apreciar como la red de fibras conserva una distribución individual sin aglomeración superficial. Esto demuestra la estabilidad en la dispersión de nanocelulosa, lo que sugiere que los procesos de aislamiento y secado permitieron la integridad fibrilar, dando como resultado una matriz interconectada de fibras [109].

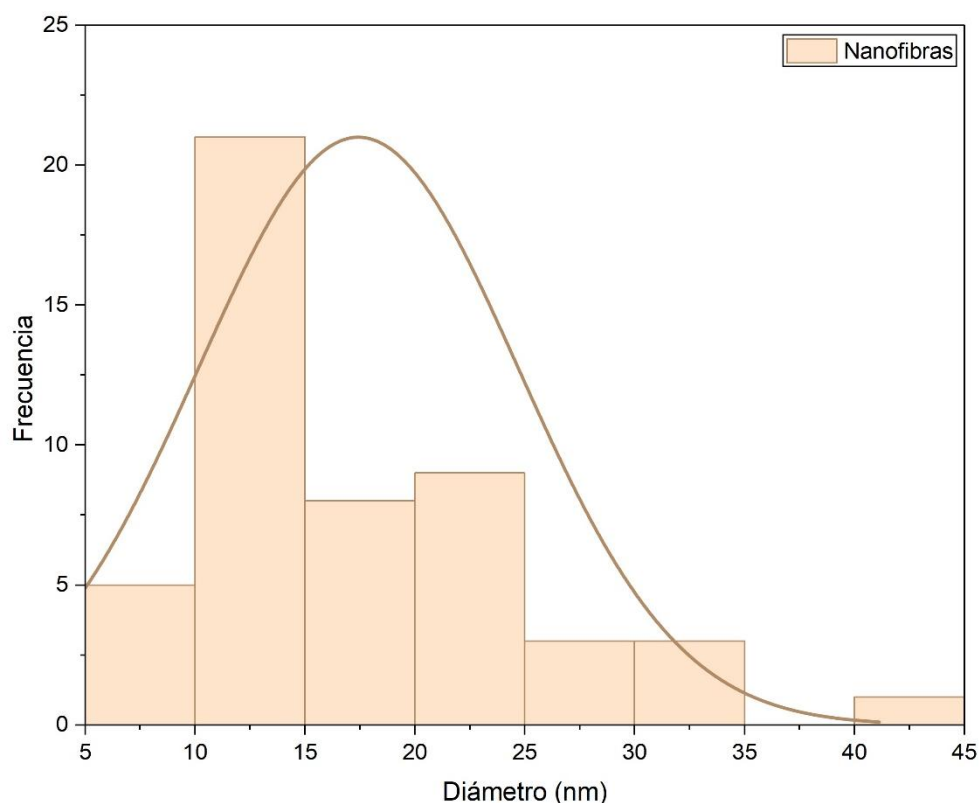


Figura 4.2 Análisis de la distribución de tamaños de una muestra de 50 nanofibras en una sección de la red laminar de nanocelulosa.

A pesar de que el sargazo presenta una estructura compleja compuesta principalmente por alginatos, fucoidanos y proteínas, se logró aislar una fracción celulósica y obtener una morfología mayormente lisa, en formato de lámina irregular. Este comportamiento atribuido a la interacción entre los grupos OH de la celulosa y las moléculas de agua. Durante el proceso de secado, la eliminación del agua reduce las interacciones “agua-celulosa” y permite una mayor interacción entre las nanofibrillas, dando como resultado una reorganización entre enlaces de hidrógeno entre

cadena, induciendo un autoensamblaje y un sucesivo apilamiento de fibrillas para la formación de estructuras más compactas. Este proceso promueve la formación de agregados con apariencia laminar como los observados en las micrografías (**Figura 4.1**) [110].

Otra cuestión relevante es con respecto a la relación de aspecto (longitud/grosor). En la **Figura 4.1 B** se pueden observar fracciones de la nanocelulosa laminar, de la cual podemos establecer un intervalo de longitud de aproximadamente 10-15 μm , aunado a un espesor de 0.1 μm (véase más adelante en la sección de *Análisis LSM*) se puede determinar una relación de aspecto de 150 (relativamente alta) y es correspondiente a las secciones de fibras alargadas formadas; esto podría ser indicativo de un formato con un mayor número de interconexiones, lo que a su vez significa una mayor resistencia.

Por otro lado, el análisis SEM para la muestra de biocarbón *AgNPs/CAS* obtenido permite establecer al sargazo como una materia prima competente en comparación con otras fuentes. El rendimiento logrado a partir del proceso de pirólisis rápida demuestra una opción ideal con potencial escalable hacia distintas áreas de interés emergente, destacando su versatilidad y eficiencia en su elaboración.

Asimismo, se alcanzaron niveles ideales en propiedades como la porosidad, el área superficial y la capacidad de adsorción, lo que favoreció un óptimo control y un soporte eficiente para la deposición de partículas [68].

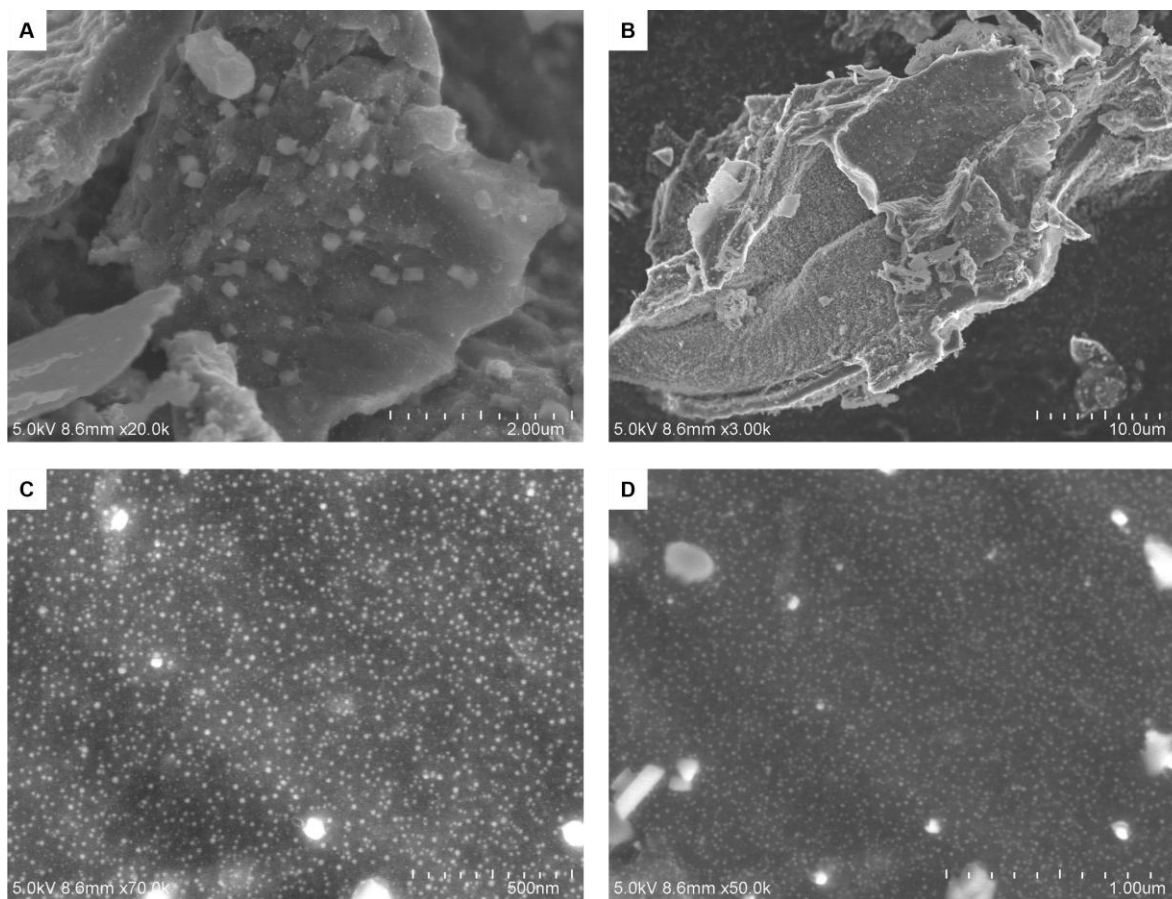


Figura 4.2 Micrografías SEM de la superficie de biocarbón dopadas con partículas de tamaño nanométrico.

En la **Figura 4.2** se muestran una serie de micrografías del aspecto general de la superficie del biocarbón (**A** y **B**), así como de la distribución homogénea de partículas de tamaño nanométrico (**C** y **D**). En la superficie general del biocarbón se puede identificar una estructura altamente porosa y fracturada, así como texturas rugosas derivadas de la descomposición térmica provocada por la pirólisis. Así mismo, se puede confirmar y apreciar la distribución uniforme de múltiples partículas de tamaño nanométrico asociadas con la reducción del precursor de nitrato de plata durante el proceso de pirolizado, lo que sugiere la posible formación de AgNPs adheridas a la superficie micro/meso porosa del biocarbón. No obstante, la verificación composicional necesitaría análisis de caracterización adicionales a partir de técnicas como, difracción de rayos X o espectroscopia de rayos X de dispersión de energía.

Esto comprueba la óptima distribución y estabilización de partícula por parte de la matriz de biocarbón, evitando que las nanopartículas metálicas se aglomeren. Así mismo, se puede

identificar una óptima disposición estructural, la cual permite una liberación controlada de iones metálicos prolongando la actividad antimicrobiana.

Por otro lado, en la **Figura 4.3** se muestra una distribución de tamaño de 217 partículas, las cuales arrojaron un tamaño promedio partícula de 13 ± 2.135 nm, lo cual está directamente asociado con una mejor actividad de inhibición, esto debido a que tienen una mayor área superficial, lo cual proporciona una mayor interacción con las células bacterianas [111].

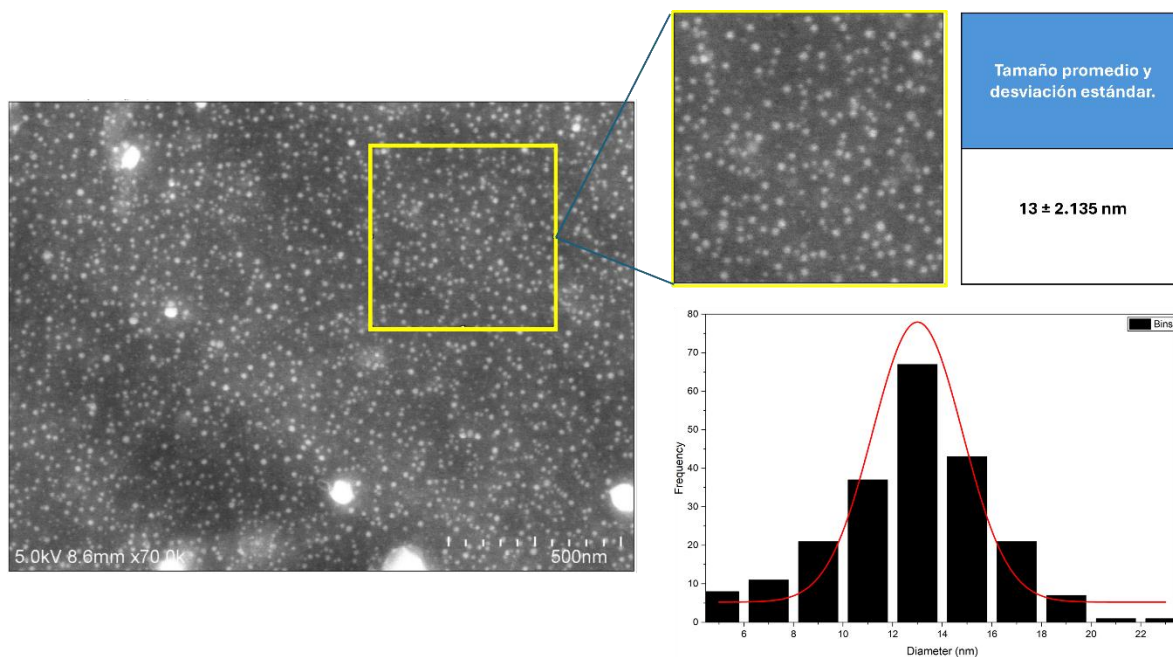


Figura 4.3 Distribución de nanopartículas metálicas en una sección de la matriz de biocarbón AgNPs/CAS.

4.3 Análisis por microscopia confocal láser (LSM).

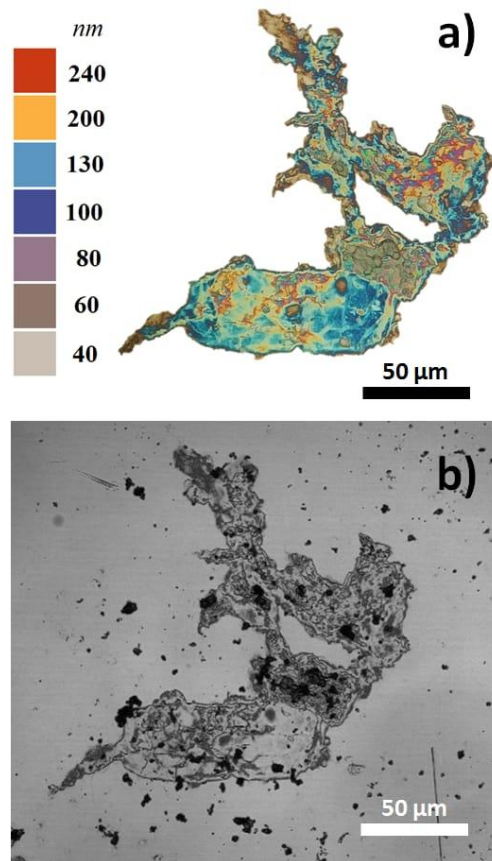


Figura 4.4 Muestra de nanocelulosa laminar desde un microscopio óptico (a) y un microscopio láser confocal.

La **Figura 4.4** presenta una muestra de nanocelulosa laminar observada con un microscopio confocal de barrido láser (b) y un microscopio óptico (a). Las medidas de espesor se obtuvieron con el microscopio confocal analizando los perfiles de altura de la muestra. Por otro lado, en las micrografías se puede apreciar que la red mantiene una superficie irregular, lo que provoca la alternación entre zonas las cuales se destacan en una gama de colores distintivos, los cuales corresponden a un espesor aproximado medido en nanómetros que varía de 40 a 240 nm. Estos colores son el resultado de los efectos de interferencia relacionados con los distintos índices de refracción de la muestra [112]. Por otro lado, se puede observar la heterogeneidad del material a partir de los bordes irregulares existentes, la porosidad y la presencia de fragmentos en su entorno.

4.4 Análisis por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).

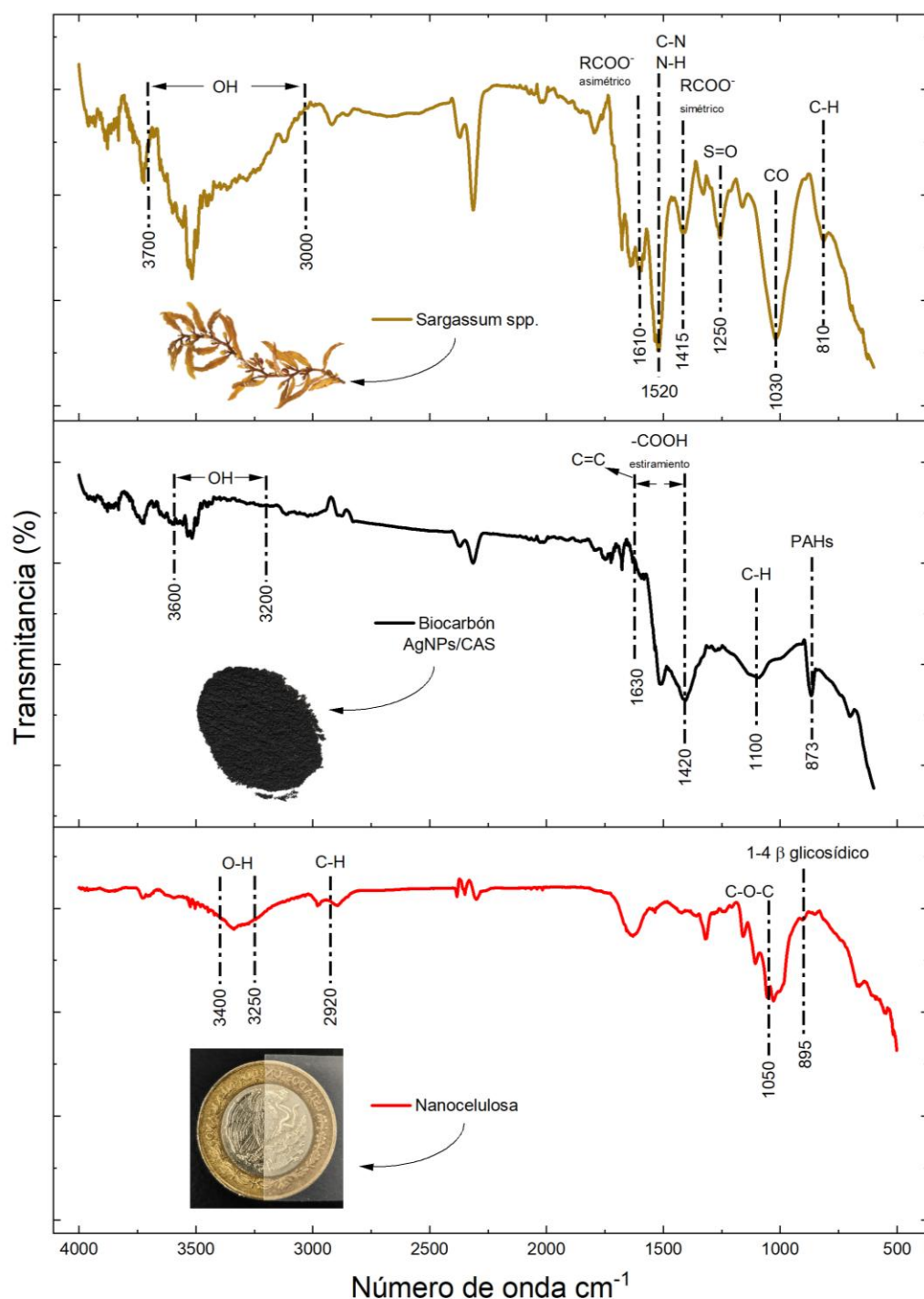


Figura 4.5 Transmitancia FTIR de la muestra de sargazo limpio, el biocarbón AgNPs/CAS y la película de nanocelulosa.

En la **Figura 4.5** se muestran los espectros FTIR del sargazo limpio, el biocarbón AgNPs/CAS y la nanocelulosa, donde se muestran sus bandas de transmitancia características. El espectro de la muestra de sargazo limpio presenta una distribución de picos anchos entre las regiones de los 3,700 y 3000 cm^{-1} , correspondientes a los grupos O-H. El pico en 1610 cm^{-1} corresponde a un estiramiento asimétrico de carboxilato (RCOO^-), esto sugiere la presencia de monómeros como el ácido mannurónico, gulurónico y urónico del componente de alginato de sodio. El pico en 1520 cm^{-1} está asociada a la disposición de enlaces peptídicos en proteínas y glucoproteínas (C-N, N-H). El pico en 1415 cm^{-1} corresponde al estiramiento simétrico de carboxilato (RCOO^-). Dentro de la región conocida como zona huella (1500 – 500 cm^{-1}) se identificaron múltiples bandas asociadas a vibraciones características de la matriz orgánica del sargazo. Particularmente la región entre 1250 y 1030 cm^{-1} se sugiere que podría corresponder principalmente a grupos funcionales como el carbonilo (C=O) y grupos sulfatos (S=O) presentes en la matriz del sargazo. El pico en 810 cm^{-1} podría estar asociado a las vibraciones de anillos aromáticos C-H de compuestos fenólicos [113-114].

El espectro de la muestra de biocarbón AgNPs/CAS presenta ligeras bandas O-H⁻¹ en la región de los 3600 y 3200 cm^{-1} . El pico en 1630 cm^{-1} se puede asociar a los anillos aromáticos (C=C) y la región de este con 1420 cm^{-1} está asociado al estiramiento del ácido carboxílico ($-\text{COOH}$), el desplazamiento de la banda hacia la región de 1420 cm^{-1} se asocia a las altas temperaturas en el proceso de pirólisis rápida. El pico en 1100 cm^{-1} corresponde al estiramiento del grupo C-H de los compuestos aromáticos. Finalmente, el pico en 873 cm^{-1} se asocia a la existencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) por efecto de la pirólisis rápida [115 - 117].

El espectro de la nanocelulosa presenta bandas anchas entre 3,400 y 3,250 cm^{-1} , correspondientes a los grupos OH⁻¹. Las bandas a 2,920 cm^{-1} indican enlaces C-H, mientras que el pico a 1,722 cm^{-1} se atribuye a los grupos funcionales carboxílico (C=O). La banda observada a 1,050 cm^{-1} corresponde al estiramiento asimétrico y a la flexión de los enlaces C–O–C. Además, el pico a 895 cm^{-1} es característico de los enlaces glucosídicos β en la celulosa [118, 21].

4.5 Análisis termogravimétrico (TGA).

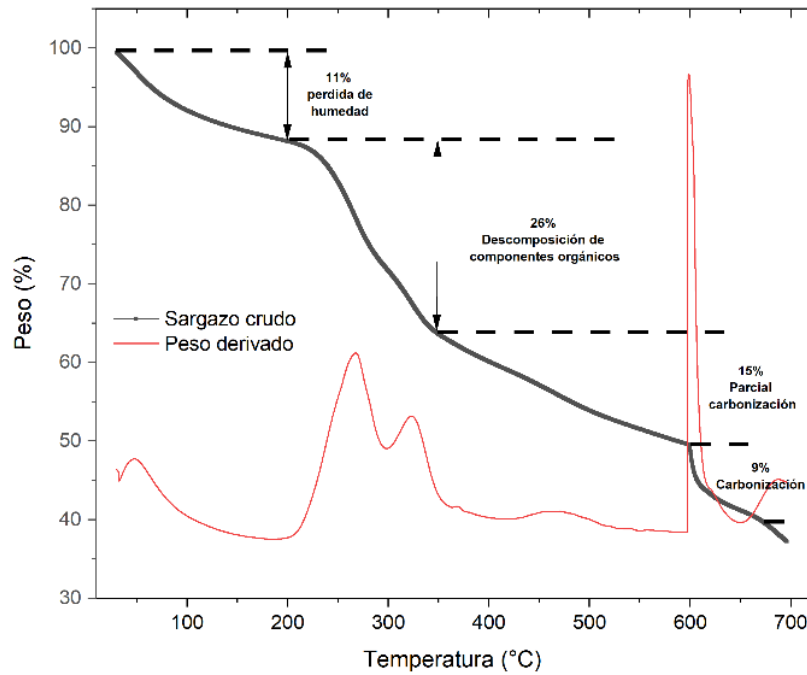


Figura 4.6. Análisis termogravimétrico de la muestra de *Sargassum* spp. crudo.

En la **Figura 4.6** se observa el análisis termogravimétrico (TGA) con su respectiva curva derivada (DTG) de la muestra de sargazo crudo. La curva en color negro representa la pérdida gradual, pero con distintos porcentajes de pérdida en cada fase de temperatura, los cuales se describen a continuación:

Temperatura ambiente – 199 °C.

En este intervalo se observa una disminución del peso de aproximadamente el 11%, lo cual podría corresponder a cierta cantidad de humedad retenida en la pared celular o distintas zonas del sargazo. Así mismo, existe un pequeño pico en la curva derivada que corrobora esta pérdida de humedad aparente. Seguidamente la curva se mantiene constante hasta los 200 °C.

De 200 – 350 °C.

En este intervalo se muestra una disminución del peso de aproximadamente el 26%, se sugiere que esto puede estar asociado al deterioro consecutivo de distintas fracciones de biopolímeros. En cuanto al pico DTG, muestra dos picos medianos (280 °C y 330 °C) lo cual podría deberse a la

descomposición volátil de los componentes orgánicos.

De 350 – 599 °C.

En esta etapa se puede observar una pérdida de aproximadamente el 15%, lo cual podría asociarse a una pre-etapa de carbonización permitiendo una estabilidad aparente en el producto de biocarbón.

De 600 – 699 °C.

Se muestra una pérdida de aproximadamente el 9%, esta región se asocia a una transformación hacia un carbono más estable, lo cual, excusa el proceso de pirolizado a 600 °C. Por otro lado, se puede observar un residual de entre 35 – 40 % correspondiente a la transformación de biomasa cruda a biocarbón, así mismo, esta también puede estar compuesta por trazas de cenizas minerales y componentes residuales (sales minerales o grupos sulfatos). Esto sugiere que el pretratamiento elimina significativamente un porcentaje de aproximadamente 25 – 30 % de componentes del alga cruda (sin tratamiento). Por otro lado, el pico de la curva DTG representa la temperatura de descomposición máxima (600 °C). [119, 120].

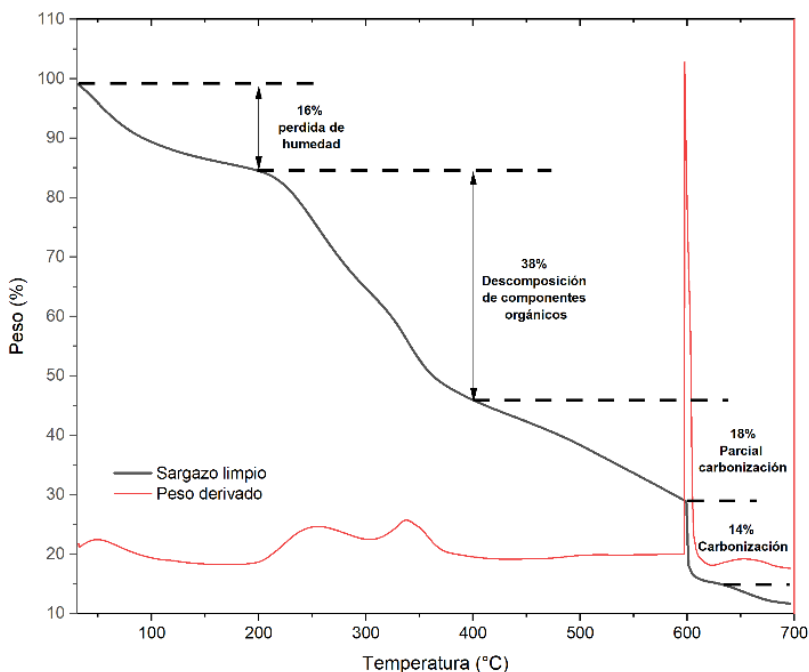


Figura 4.7. Análisis termogravimétrico de la muestra de *Sargassum* spp. limpio.

En la **Figura 4.7** se observa el análisis termogravimétrico (TGA) con su respectiva curva derivada (DTG) de la muestra de sargazo limpio. El barrido de la muestra de sargazo limpio fue realizado desde la temperatura ambiente ($\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta los $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual se muestra a continuación:

Temperatura ambiente – $199\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se muestra una disminución del peso de aproximadamente el 16%, lo cual, podría corresponder a una humedad aparente dentro de la muestra. En la curva DTG se muestra un leve pico que confirma está perdida, posteriormente permanece constante hasta los $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. **De**

$200 - 399\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se muestra una disminución en la curva TGA y dos picos medianamente prominentes en la curva DTG. Esto se puede relacionar con respecto a la descomposición de componentes orgánicos volátiles, como hemicelulosa, restos de fucoïdan, alginato, carbohidratos y demás componentes de la pared celular del alga.

De $400 - 599\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En este intervalo se establece una perdida menos significativa del material, lo cual, podría estar asociado a la gradual carbonización de los componentes de celulosa, generando una parcial estabilización del biocarbón en aproximadamente el 30%.

De $600 - 699\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se observa una caída del 14%, al igual que sucede con la muestra sargazo crudo, esta disminución ocurre por la formación de un carbono más estable, justificando el proceso de pirólisis a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, o a su vez por la posible continua liberación de compuestos volátiles remanentes. En adición, se puede observar un residual correspondiente a la transformación completa de biomasa cruda a biocarbón, no obstante, también podría asociarse a remanentes sutiles de cenizas o minerales. Por otro lado, el pico significativo en color rojo representa la temperatura de descomposición máxima ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$) [119, 120].

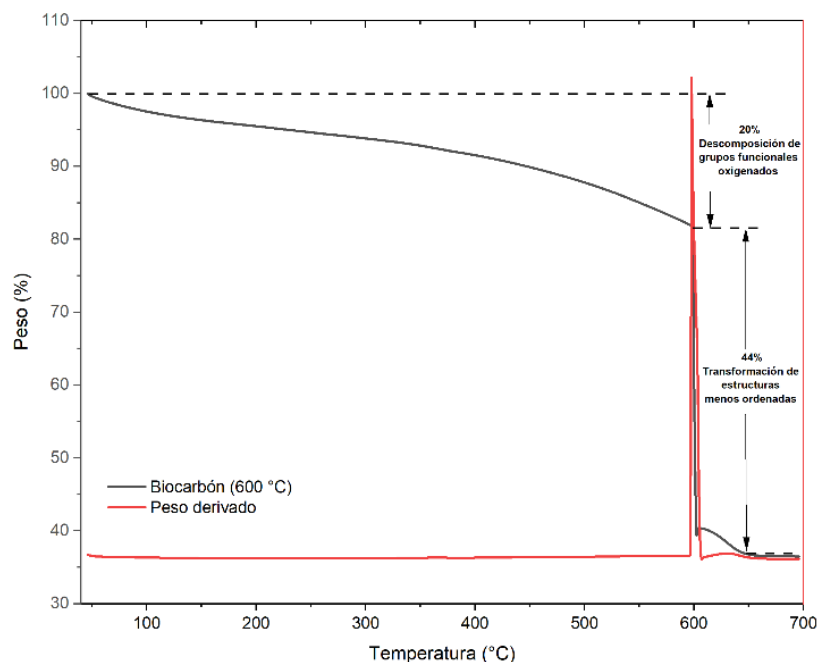


Figura 4.7. Análisis termogravimétrico de la muestra de biocarbón AgNPs/CAS.

En la **Figura 4.7** se observa el análisis termogravimétrico (TGA) con su respectiva curva (DTG) de la muestra del biocarbón de sargazo. Donde la curva en color negro representa la pérdida de peso con respecto a la temperatura, en la cual, se aprecian pérdidas progresivas de aproximadamente el 20 % desde la **temperatura ambiente** hasta llegar a los **599 °C** (probablemente por la descomposición de grupos funcionales oxigenados en la superficie del carbón como, carboxilos, lactonas, fenoles). Al alcanzar los **600 °C** se muestra una disminución significativa del 40 % debido al reordenamiento estructural del biocarbón. Seguidamente la curva se estabiliza en un porcentaje de biocarbón de entre el 35-40%, resultando en un biocarbón estructuralmente más ordenado. A pesar de ello, se presenta una buena estabilidad térmica del biocarbón. El pico significativo en color rojo (curva DTG) representa la temperatura de descomposición máxima (600 °C) [119 – 122].

4.6 Análisis por espectroscopia de resonancia magnética nuclear (NMR).

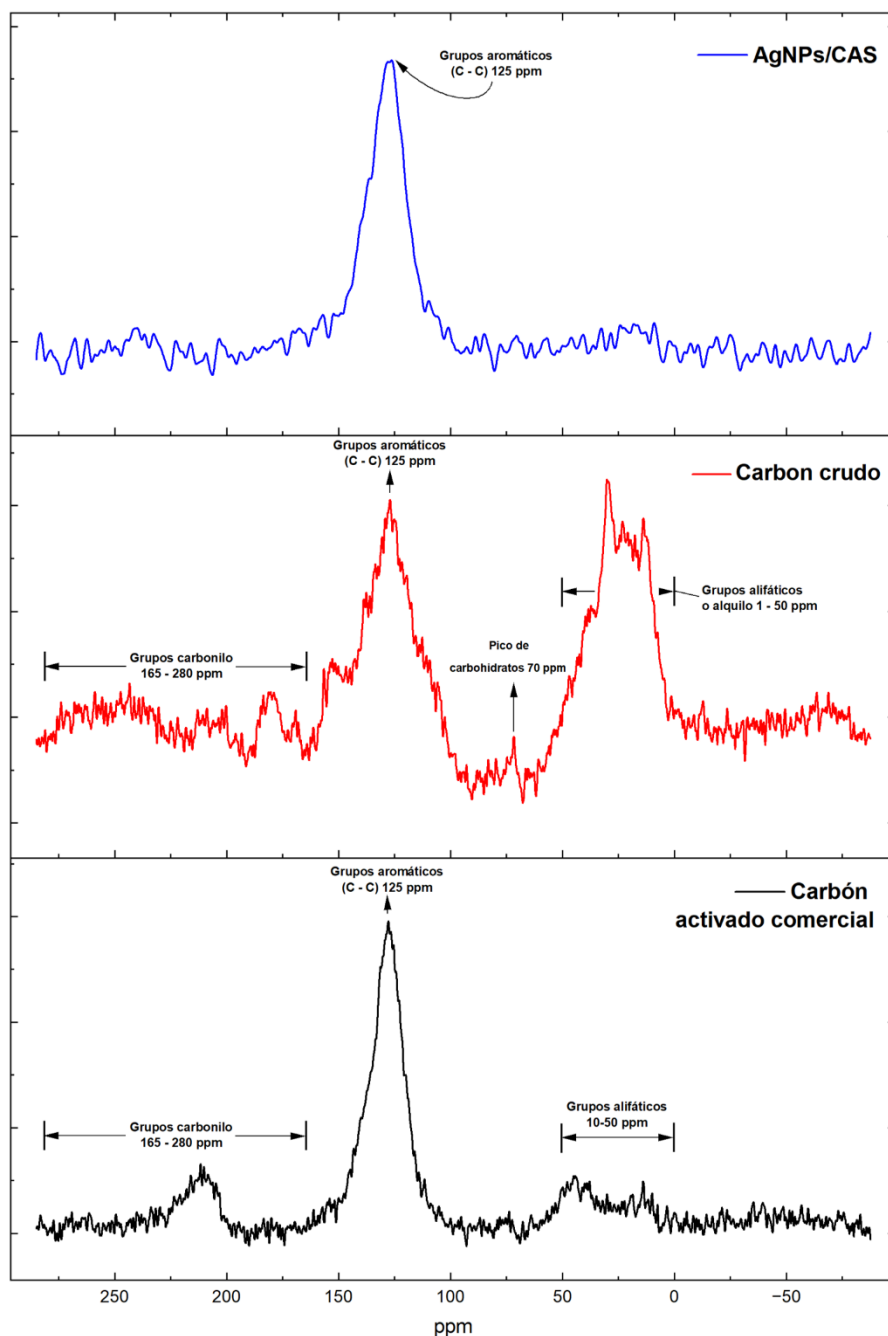


Figura 4.9 Análisis de las muestras de AgNPs/CAS, carbón crudo y carbón comercial por espectroscopia de resonancia magnética nuclear de carbono-13 (^{13}C -NMR).

En la **Figura 4.9** se muestran los resultados de ^{13}C -RMN para los materiales del biocarbón AgNPs/CAS, biocarbón crudo y carbón activado comercial. En todos los casos de los materiales carbonosos estudiados se puede apreciar un pico prominente en 125 ppm, el cual está asociado a

un espectro típico compuesto por una línea de resonancia con átomos de carbono de grupos aromáticos, que es característico en procesos de descomposición térmica. Es posible observar picos más finos en los casos del biocarbón AgNPs/CAS y la muestra de control activado, esto es debido a las temperaturas de trabajo empleadas, donde al verse aumentadas durante el procesamiento el dominio de este pico se vuelve más relevante; caso contrario de la muestra de carbón crudo, donde se puede observar un ligero ensanchamiento del pico correspondiente a esta zona [123].

Carbón crudo (350 °C)

En el caso del material de carbón crudo, esta muestra una mayor serie de picos de resonancia, que pueden deberse a la parcial carbonización. En el intervalo de 1 – 50 ppm existen picos los cuales pueden estar asociados a cadenas alifáticas correspondientes a carbonos alifáticos sp^3 , principalmente $-CH_3$, $-CH_2$, o en su defecto y menor proporción a señales anchas de grupos alquilo como C-N. Por otra parte, también se puede apreciar un ligero pico ensanchado en 70 ppm en la zona de 50 – 100 ppm, que podría corresponder a una señal de carbohidrato C-O, el cual podría estar asociado a polisacáridos remanentes en la matriz. Así pues, esto indicaría que los tratamientos a temperaturas menores a los 350 °C resultan en un material compuesto principalmente por residuos poliméricos como la celulosa y la lignina, además de permitir que aceites por parte de componentes bioactivos como el fucoidan, no terminen de volatilizarse. Por otra parte, se pueden observar picos en 155 ppm, los cuales se atribuyen a grupos carbonilo. Los picos superiores a 165 ppm suelen estar relacionados con grupos carbonilos [124-127].

AgNPs/CAS

En el caso del material de biocarbón AgNPs/CAS se puede observar un pico relevante y fino en la región de 125 ppm, como se mencionó anteriormente, este pico está asociado a un espectro típico de carbono de grupos aromáticos (C-C) [123]. Así mismo, también se puede observar que el barrido muestra un ruido más predominante con respecto a la base del espectro, esto podría relacionarse con los análisis realizados en la sección de TGA, donde se muestra que en el material residual de cenizas de las muestras de sargazo se pueden encontrar residuos que pueden atribuirse a sales minerales, así como grupos sulfatos [119, 120].

Carbón activado comercial.

En el material de carbón activado comercial también se puede apreciar la presencia del pico en 125 ppm, el cual también es atribuido a la presencia de carbono de grupos aromáticos (C-C) [1]. Así mismo, también se puede observar una región de los 1 – 50 ppm la cual es atribuida a ligeras señales de cadenas alifáticas o de grupos alquilo. Así mismo, se puede apreciar la presencia de un pico en el intervalo de 165 – 220 ppm, el cual está asociado a los grupos carbonilos [127, 128].

Estos resultados muestran la aparición de grupos característicos correspondientes al carbón activado, logrando así demostrar una eficiente obtención de este a partir del alga *Sargassum spp.*

4.7 Evaluación y análisis de la actividad antimicrobiana del biocarbón AgNPs/CAS.

Se evaluó y analizó el comportamiento de inhibición en las muestras de biocarbón control y el biocarbón *AgNPs/CAS* frente a los agentes microbianos *E. coli*, *S. aureus* y la levadura *C. albicans* mediante el método por contacto. Este estudio tuvo como propósito analizar la interacción entre el soporte de biocarbón y su funcionalización con nanopartículas metálicas, así como su desempeño en cuanto a la inhibición de agentes patógenos. En el caso del biocarbón control se aprecia una inhibición aparente limitada. A pesar de que el alga sargazo es un material basto en componentes bioactivos, una proporción considerable de estos se ve reducida debido al proceso de pirolizado, dando lugar a un material altamente poroso, pero, sin acción inhibitoria al interactuar con medios de cultivo bacterianos. En la **Tabla 4.6** se presentan las mediciones correspondientes a los halos de inhibición de ambas muestras, *biocarbón control* y *AgNPs/CAS* a partir de la siembra de las cepas bacterianas y de la levadura, las cuales estuvieron en contacto directo con ambos materiales de biocarbón. Asimismo, en la **Figura 4.10** se pueden apreciar los cultivos realizados, donde se evidencia que el biocarbón *AgNPs/CAS* desempeña una notable actividad de inhibición en las bacterias *E. coli* y *S. aureus*, así como en la levadura *C. albicans*, en contraste con el biocarbón control que no muestra inhibición. El efecto de inhibición puede deberse a la concentración del precursor de nitrato de plata (AgNO_3) propuesto, evitando una aglomeración significativa y favoreciendo la disponibilidad de un mayor número de sitios activos en la superficie porosa del biocarbón. Se hipotetiza que un incremento en la concentración del precursor puede favorecer zonas de aglomeración o agrupación entre partículas, dando lugar a la formación de agregados y disminuyendo el área superficial de las partículas nanométricas formadas, derivando en una reducción o incluso un nulo efecto antimicrobiano.

Adicionalmente, durante el proceso de pirólisis del *Sargassum* spp., la biomasa experimenta una serie de conversiones térmicas que van desde la deshidratación, despolimerización y fragmentación de sus componentes estructurales, tales como polisacáridos y compuestos fenólicos. A 600 °C, dichos fragmentos atraviesan procesos de aromatización y reorganización estructural, dando como resultado la formación de una matriz carbonosa altamente micro/meso porosa. De manera simultánea, a partir del precursor metálico (AgNO_3) se producen iones Ag^+ por efecto de la descomposición térmica, los cuales son reducidos in situ por especies reductoras generadas durante el proceso de pirólisis, tales como CO o H_2 formando plata metálica (Ag^0). Posteriormente, estos átomos de plata nucleon y crecen formando partículas de plata (AgNPs), las cuales, sucesivamente quedan ancladas a la superficie del biocarbón mediante interacciones con grupos funcionales oxigenados y defectos estructurales, resultando en un material compuesto con una distribución homogénea.

En adición, el crecimiento promueve la eficiente liberación de iones de metálicos por parte de las nanopartículas ancladas al material carbonoso, lo cual, puede llegar a deteriorar membranas celulares e inducir a la muerte bacteriana o de levadura provocada por la alteración directa de la estructura y material intracelular constituyente [129-131].

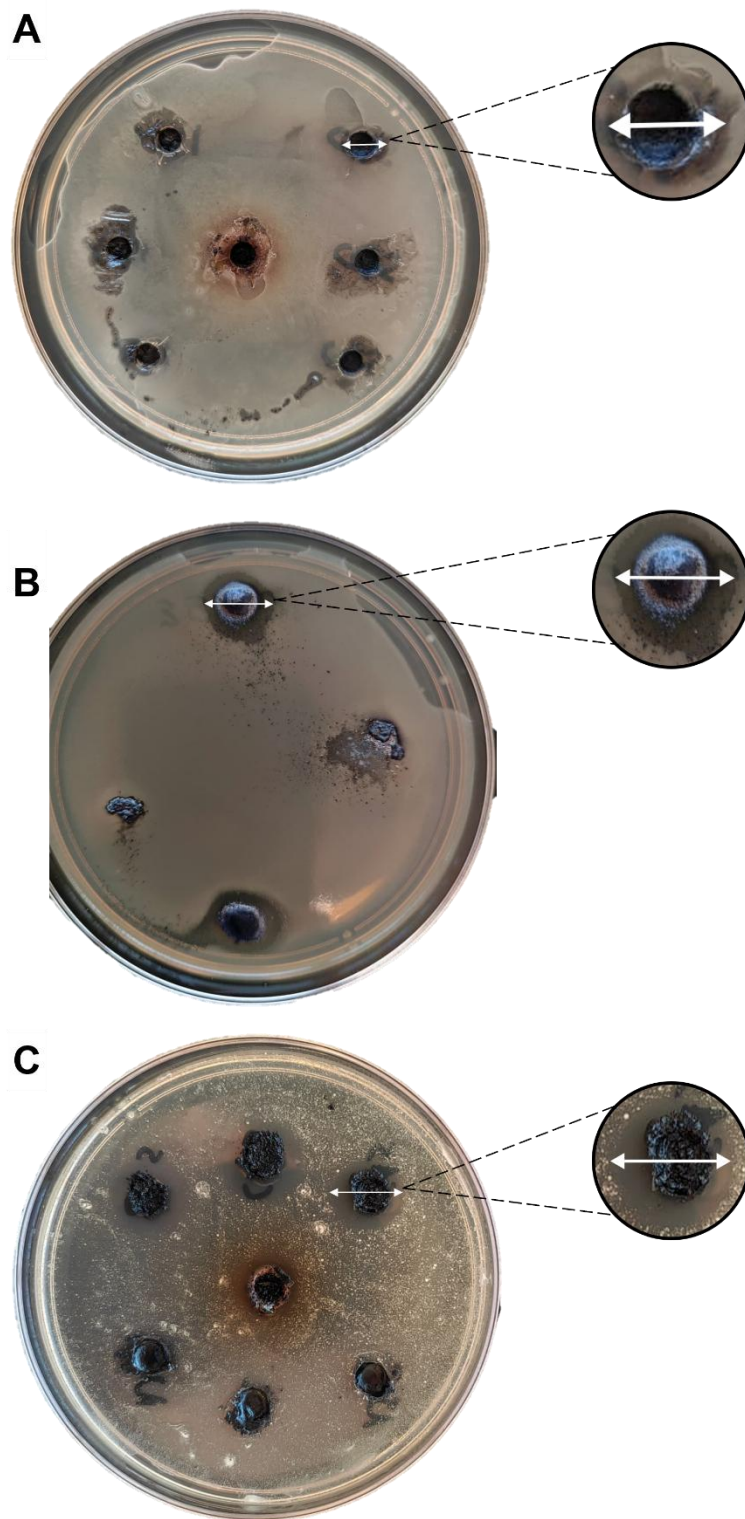


Figura 4.10 Pruebas antimicrobianas para las muestras de AgNPs/CAS frente a las cepas bacterianas *S. aureus* (A), *E. coli* (B) y *C. albicans* (C).

Tabla 4.6 Zonas de inhibición en las muestras de biocarbón control y biocarbón AgNPs/CAS.

		Biochar (control)	AgNPs/CAS
	Microorganismos	Zona de inhibición	Zona de inhibición
Bacteria	<i>E. coli</i>	0 mm	9 mm
	<i>S. aureus</i>	0 mm	17 mm
Levadura	<i>C. albicans</i>	0 mm	17.5 mm

Capítulo 5.

Conclusiones.

En la presente investigación se demuestra que el *Sargassum* spp. puede ser valorizado de manera escalable mediante procedimientos sencillos que permiten la obtención simultánea de materiales funcionales con valor agregado, como nanocelulosa laminar y biocarbón dopado con nanopartículas metálicas. Esta investigación hace hincapié en el proceso de desarrollo, el cual reduce el uso de reactivos químicos y etapas de tratamiento logrando mantener propiedades estructurales en los materiales obtenidos.

Se demostró que el tratamiento térmico y de hidrólisis aplicado permite la formación estable de una red fibrilar de nanocelulosa. Por otro lado, la materia prima de sargazo a través de un proceso de pirólisis permitió la generación de una matriz carbonosa con características óptimas para la funcionalización y estabilización de nanopartículas metálicas. Este comportamiento confirma que la biomasa de sargazo puede desarrollarse y actuar de manera simultánea como fuente estructural y como medio en procesos que involucren una transformación termoquímica. Asimismo, la incorporación de nanopartículas metálicas en el biocarbón confiere propiedades antimicrobianas relevantes, siendo esto prometedor para aplicaciones en liberación controlada de agentes activos.

Este resultado valida la funcionalidad del material sintetizado, así como el potencial de la visión propuesta para el desarrollo de materiales multifuncionales a partir de residuos.

En síntesis, este estudio establece una ruta viable y escalable hacia la valorización del sargazo, contribuyendo al aprovechamiento sostenible de este recurso y sentando bases para su implementación en proyectos de economía circular y planes de gestión de residuos a mayor escala.

Capítulo 6.

Bibliografía.

Capítulo 1

- [1] Paredes-Camacho, R. M., González- Morales, S., José Antonio González- Fuentes, Rodríguez- Jasso, R. M., Benavides-Mendoza, A., Charles- Rodríguez, A. V., & Robledo-Olivo, A. (2023). Characterization of *Sargassum* spp. from the Mexican Caribbean and Its Valorization through FermentatioCn Process. *Processes*, 11(3), 685–685. <https://doi.org/10.3390/pr11030685>
- [2] Triñanes, J., Hu, C., Putman, N., Olascoaga, M., Beron-Vera, F., Goni, G., & Zhang, S. (2021). An Integrated Observing Effort for *Sargassum* Monitoring and Warning in the Caribbean Sea, Tropical Atlantic, and Gulf of Mexico. *Oceanography*, 68–69. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2021.supplement.02-26>
- [3] Tussenbroek, van, L. Verónica Monroy-Velázquez, García-Sánchez, M., Ruiz-Fernández, A. C., Valencia-Castañeda, G., Paéz-Osuna, F., Arenas, P., R. Isaac Rojas-González, & Gracia, A. (2024). Biochemistry and associated fauna of holopelagic *Sargassum* spp. in the Caribbean Sea. *Marine Biology*, 171(10). <https://doi.org/10.1007/s00227-024-04517-z>
- [4] Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Tussenbroek, van, Francisco, V., Estévez, M., Celis, L. B., L. Verónica Monroy-Velázquez, Leal-Bautista, R., Álvarez-Filip, L., García-Sánchez, M., Masia, L., & Silva, R. (2020). Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12(10), 2908–2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>

- [5] Caballero Vázquez, J., Acosta González, G., & Hernández Zepeda (2020). El sargazo, un fenómeno complejo. Amc.edu.mx. <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/ediciones-antteriores/edicion-actual/827-el-sargazo-un-fenomeno-complejo>
- [6] Devault, D. A., Pierre, R., Hélène Marfaing, Franck Dolique, & Lopez, P.-J. (2020). Sargassum contamination and consequences for downstream uses: a review. *Journal of Applied Phycology*, 33(1), 567–602. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02250-w>
- [7] Speede, R., Alleyne, K., & Cox, S.-A. L. (2024). *Innovations for Sargassum Resilience*. <https://doi.org/10.18235/0013107> =
- [8] de, B., Metcalfe, S. E., Smith, G., Sofie Sjögersten, Boyd, D. S., Cerdeira-Estrada, S., López-Ramírez, P., Magaldi, A., Rainer Ressler, Perera-Valderrama, S., Hansel Caballero-Aragón, Siordia, O. S., Couldridge, J., Gray, P., Silva, R., Brigitta I. Van Tussenbroek, Escalante-Mancera, E., & Foody, G. (2023). Monitoring holopelagic Sargassum spp. along the Mexican Caribbean coast: understanding and addressing user requirements for satellite remote sensing. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1166000>
- [9] Rosellón-Druker, J., McAdam-Otto, L., Suca, J. J., Seary, R., Gaytán-Caballero, A., Escobar, E., Hazen, E. L., & Estes, M. G. (2023). Local ecological knowledge and perception of the causes, impacts and effects of Sargassum massive influxes: a binational approach. *Ecosystems and People*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/26395916.2023.2253317>
- [10] Perceived Sargassum event incidence, impacts, and management response in the Caribbean Basin. (2024). *Marine Policy*, 165, 106214. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106214>
- [11] Thompson, T. M., Young, B. R., & S. Baroutian. (2019). Pelagic Sargassum for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109564–109564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109564>
- [7] Richéda Speede, Alleyne, K., & Cox, S.-A. L. (2024). *Innovations for Sargassum Resilience*. <https://doi.org/10.18235/0013107>
- [12] Kim, J.-H., Shim, B. S., Kim, H. S., Lee, Y.-J., Min, S.-K., Jang, D., Abas, Z., & Kim, J. (2015). Review of nanocellulose for sustainable future materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green* <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0024-9>

- [13] Toro, R. G., Adel, A. M., de Caro, T., Federici, F., Cerri, L., Bolli, E., Mezzi, A., Barbalinardo, M., Gentili, D., Cavallini, M., Al-Shemy, M. T., Montanari, R., & Caschera, D. (2021). Evaluation of Long-Lasting Antibacterial Properties and Cytotoxic Behavior of Functionalized Silver-Nanocellulose Composite. *Materials*, 14(15), 4198. <https://doi.org/10.3390/ma14154198>
- [14] Attasith Parnsubsakul, Umphan Ngoensawat, Tuksadon Wutikhun, Thanyada Sukmanee, Chaweewan Sapcharoenkun, Prompong Pienpinijtham, & Sanong Ekgasit. (2020). Silver nanoparticle/bacterial nanocellulose paper composites for paste-and-read SERS detection of pesticides on fruit surfaces. *Carbohydrate Polymers*, 235, 115956–115956. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115956>
- [15] Zhao, J., Cai, J., Huang, Y., & Luo, J. (2025). Nanocellulose-based carbon sphere immobilized AgNPs for antibacterial cellulosic paper. *Industrial Crops and Products*, 230, 121120. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121120>
- [16] Suely Patrícia C. Gonçalves, Strauss, M., Delite, F. S., Clemente, Z., Castro, V. L., & Stéfani, D. (2016). Activated carbon from pyrolysed sugarcane bagasse: Silver nanoparticle modification and ecotoxicity assessment. *The Science of the Total Environment*, 565, 833–840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.041>
- [17] Doh, H., Lee, M. H., & Whiteside, W. S. (2019). Physicochemical characteristics of cellulose nanocrystals isolated from seaweed biomass. *Food Hydrocolloids*, 102, 105542–105542. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105542>
- [18] Salem, D. M. S. A., & Ismail, M. M. (2021). Characterization of cellulose and cellulose nanofibers isolated from various seaweed species. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 48(4), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.11.001>
- [19] Steven, S., Mardiyati, Y., Mar’atus Shoimah, S., Rizkiansyah, R. R., Puji Santosa, S., & Suratman, R. (2021). Preparation and Characterization of Nanocrystalline Cellulose from *Cladophora* sp. Algae. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(3), 1035–1041. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.3.10278>

[20] Kim, J.-H., Jeong, J.-J., & Lee, J.-S. (2024). Eco-Friendly Isolated Nanocellulose from Seaweed Biomass via Modified-Acid and Electron Beam Process for Biodegradable Polymer Composites. *Journal of Composites Science*, 8(7), 253. <https://doi.org/10.3390/jcs8070253>

[21] L. Chávez-Guerrero, A. Toxqui-Terán, & O. Pérez-Camacho. (2021). One-pot isolation of nanocellulose using pelagic *Sargassum* spp. from the Caribbean coastline. *Journal of Applied* <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02643-5>

Capítulo 2

[22] Olguin-Maciél, E., Leal-Bautista, R. M., Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J., & Tapia-Tussell, R. (2022). Environmental impact of *Sargassum* spp. landings: an evaluation of leachate released from natural decomposition at Mexican Caribbean coast. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(60), 91071–91080. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22123-8>

[23] Rodríguez-Martínez, R. E., Torres-Conde, E. G., J Rosellón-Druker, N Cabanillas-Terán, & U Jáuregui-Haza. (2025). The Great Atlantic *Sargassum* Belt: Impacts on the Central and Western Caribbean - A Review. *Harmful Algae*, 144, 102838–102838. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2025.102838>

[4] Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Tussenbroek, van, Francisco, V., Estévez, M., Celis, L. B., L. Verónica Monroy-Velázquez, Leal-Bautista, R., Álvarez-Filip, L., García-Sánchez, M., Masia, L., & Silva, R. (2020). Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12(10), 2908–2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>

[24] Bauta, J., Calbrix, E., Capblancq, S., Cecutti, C., Jérôme Peydecastaing, Raynaud, C. D., Rouilly, A., Simon, V., Vaca-Medina, G., Vandenbossche, V., Vedrenne, E., & Caro, P. D. (2024). Global Chemical Characterization of *Sargassum* spp. Seaweeds from Different Locations on Caribbean Islands: A Screening of Organic Compounds and Heavy Metals Contents. *Phycology*, 4(2), 190–212. <https://doi.org/10.3390/phycolgy4020011>

[25] Lee, M.-C., Yeh, H.-Y., Chang, C.-M., Liou, Y.-F., Nan, F.-H., & Wungen-Sani, J. (2023). Tracking and Utilizing *Sargassum*, an Abundant Resource from the Caribbean Sea. *Water*, 15(15), 2694–2694. <https://doi.org/10.3390/w15152694>

- [1] Paredes-Camacho, R. M., González-Morales, S., González-Fuentes, J. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Benavides-Mendoza, A., Charles-Rodríguez, A. V., & Robledo-Olivo, A. (2023). Characterization of *Sargassum* spp. from the Mexican Caribbean and Its Valorization through Fermentation Process. *Processes*, 11(3), 685. <https://doi.org/10.3390/pr11030685>
- [26] A comparative study of *Sargassum* species from the Yucatan Peninsula coast: morphological and chemical characterisation. (2020). *Phycologia*. <https://doi.org/10.1080/00318884.2020.1738194>
- [27] Deniaud-Bouët, E., Kervarec, N., Michel, G., Tonon, T., Kloareg, B., & Cécile Hervé. (2014). Chemical and enzymatic fractionation of cell walls from Fucales: insights into the structure of the extracellular matrix of brown algae. *Annals of Botany*, 114(6), 1203–1216. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu096>
- [28] Davis, T. A., & Davis, T. A. (2019). *Cadmium biosorption and selectivity of sargassum spp. and their alginates in relation to their [alpha]-L-guluronic acid content and conformation*. EScholarship@McGill; McGill University. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/8p58pd50d>
- [29] Rezende, R., Bártolo, P. J., Mendes, A., & Filho, R. M. (2024). *ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ALGINATO COMO BIOMATERIAL PARA A FABRICAÇÃO DE SCAFFOLDS NA...* ResearchGate; unknown. https://www.researchgate.net/publication/267848280_ANALISE_DO_COMPORTAMENTO_MECANICO_DO_ALGINATO_COMO_BIOMATERIAL_PARA_A_FABRICACAO_DE_SCAFFOLDS_NA_ENGENHARIA_DE_TECIDOS
- [30] Hifney, A. F., Fawzy, M. A., Abdel-Gawad, K. M., & Gomaa, M. (2015). Industrial optimization of fucoidan extraction from *Sargassum* sp. and its potential antioxidant and emulsifying activities. *Food Hydrocolloids*, 54, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.022>
- [31] Leandro, A., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. M. (2019). Diverse Applications of Marine Macroalgae. *Marine Drugs*, 18(1), 17. <https://doi.org/10.3390/md18010017>

- [32] You, L., Gong, Y., Li, L., Hu, X., Brennan, C., & Kulikouskaya, V. (2019). Beneficial effects of three brown seaweed polysaccharides on gut microbiota and their structural characteristics: An overview. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(3), 1199–1206. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14408>
- [33] Tsekos, I. (1999). THE SITES OF CELLULOSE SYNTHESIS IN ALGAE: DIVERSITY AND EVOLUTION OF CELLULOSE-SYNTHESIZING ENZYME COMPLEXES. *Journal of Phycology*, <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3540635.x>
- [34] López-Sosa, L. B., José Juan Alvarado-Flores, Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J., Alcaraz-Vera, J. V., José Guadalupe Rutiaga-Quñones, Zárate-Medina, J., María Liliana Ávalos-Rodríguez, & Morales-Máximo, M. (2020). A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic *Sargassum* spp. as a Solid Biofuel Energy Source. *Applied Sciences*, 10(23), 8706–8706. <https://doi.org/10.3390/app10238706>
- [35] Siddhanta AK, Prasad K, Meena R et al (2009) Profiling of cellulose content in Indian seaweed species. *Bioresour Technol* 100:6669–6673. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.047>
- [36] Konstantin Bogolitsyn, Parshina, A., & Lyudmila Aleshina. (2020). Structural features of brown algae cellulose. *Cellulose*, 27(17), 9787–9800. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03485-z>
- [37] Heinze, T. (2015). Cellulose: Structure and Properties. *Advances in Polymer Science*, 1–52. https://doi.org/10.1007/12_2015_319
- [38] Jesus, B. C., Sáenz, B., Santiago, R., Martins, A., Pedrosa, R., González-Miquel, M., & Marrucho, I. M. (2023). Valorisation of *Sargassum muticum* through the extraction of phenolic compounds using eutectic solvents and intensification techniques. *RSC Sustainability*, 1(5), 1245–1258. <https://doi.org/10.1039/d3su00051f>
- [39] Desrochers, A., Oxenford, H., Cox, S.-A., & Tussenbroek, van. (2020, January 1). *Sargassum uses guide: a resource for Caribbean researchers, entrepreneurs and policy makers*. https://www.researchgate.net/publication/372066909_Sargassum_uses_guide_a_resource_for_Caribbean_researchers_entrepreneurs_and_policy_makers

- [40] Alleyne, K. S. T., Neat, F., & Oxenford, H. A. (2023). An analysis of arsenic concentrations associated with sargassum influx events in Barbados. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 115064–115064. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115064>
- [41] B.A. Salazar-Cruz, S. Zapien-Castillo, G. Hernández-Zamora, & J.L. Rivera-Armenta. (2020). Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum. *Construction and Building Materials*, 271, 121876–121876. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121876>
- [42] Gray, L. A., Bisonó, A. G., Rojas, F. E., Veroneau, S. S., & Slocum, A. H. (2021). Caribbean-Wide, Negative Emissions Solution to Sargassum spp. Low-Cost Collection Device and Sustainable Disposal Method. *Phycology*, 1(1), 49–75. <https://doi.org/10.3390/phyecology1010004>
- [43] Solar Impulse Foundation. (2025, 15 enero). *GreenShell Films/bags*. En Solutions Explorer. Recuperado de <https://solarimpulse.com/solutions-explorer/greenshell-films-bags>
- [44] Spargassum. (2021, February). *Spargassum – Nourish your skin, naturally*. Spargassum. <https://spargassum.com/>
- [7] Richéda Speede, Alleyne, K., & Cox, S.-A. L. (2024). *Innovations for Sargassum Resilience*. <https://doi.org/10.18235/0013107>
- [45] Salas, C., Nypelö, T., Rodriguez-Abreu, C., Carrillo, C., & Rojas, O. J. (2014). Nanocellulose properties and applications in colloids and interfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 19(5), 383–396. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.10.003>
- [46] Al-Rubaye, A. H., Jasim, D. J., Ameen, H. F. M., Al-Robai, H. A., & Al-Assal, J. R. (2023). The Impacts of Petroleum on Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1158(3), 032014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1158/3/032014>
- [47] Ya', W. M. H. W., acob, N. A., & Aziz, F. A. (2017). Nanocellulose: a promising material for engineering - an overview. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 8(2), 71. <https://doi.org/10.1504/ijmatei.2017.088075>

- [48] Peng, B. L., Dhar, N., Liu, H. L., & Tam, K. C. (2011). Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: A nanotechnology perspective. *The Canadian Journal of Chemical* <https://doi.org/10.1002/cjce.20554>
- [49] Karim Missoum, Belgacem, M., & Bras, J. (2013). Nanofibrillated Cellulose Surface Modification: A Review. *Materials*, 6(5), 1745–1766. <https://doi.org/10.3390/ma6051745>
- [50] Sharma, C., & Bhardwaj, N. K. (2019). Bacterial nanocellulose: Present status, biomedical applications and future perspectives. *Materials Science and Engineering C*, 104, 109963–109963. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109963>
- [12] Kim, J.-H., Shim, B. S., Kim, H. S., Lee, Y.-J., Min, S.-K., Jang, D., Abas, Z., & Kim, J. (2015). Review of nanocellulose for sustainable future materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(2), 197–213. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0024-9>
- [51] Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941. <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>
- [52] Lee, H. V., Hamid, S. B. A., & Zain, S. K. (2014). Conversion of Lignocellulosic Biomass to Nanocellulose: Structure and Chemical Process. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2014/631013>
- [53] Walker, L. P., & Wilson, D. B. (1991). Enzymatic hydrolysis of cellulose: An overview. *Bioresource Technology*, 36(1), 3–14. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90095-2](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90095-2)
- [54] Chen, Y. W., Lee, H. V., Juan, J. C., & Phang, S.-M. (2016). Production of new cellulose nanomaterial from red algae marine biomass *Gelidium elegans*. *Carbohydrate Polymers*, 151, 1210–1219. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.083>
- [55] Bolio-López, G. I., Valadez-González, A., Veleza, L., & Andreeva, A. (2025). Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: Obtención y caracterización. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 291–299. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200013

- [56] MOHOMANE, S. M., MOTLOUNG, S. V., KOAO, L. F., & MOTAUNG, T. E. (2022). EFFECTS OF ACID HYDROLYSIS ON THE EXTRACTION OF CELLULOSE NANOCRYSTALS (CNCs): A REVIEW. *Cellulose Chemistry and Technology*, 56(7-8), 691–703. <https://doi.org/10.35812/cellulosechemtechnol.2022.56.61>
- [57] Akira Isogai, Saito, T., & Hayaka Fukuzumi. (2010). TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale*, 3(1), 71–85. <https://doi.org/10.1039/c0nr00583e>
- [58] Shamima Akter Smriti, Abu, Khadem, A. H., Fahmida Siddiqa, Rahman, M., Humayra Akhter Himu, Nawshin Farzana, Islam, M. A., & Naebe, M. (2023). Recent developments of the nanocellulose extraction from water hyacinth: a review. *Cellulose*, 30(14), 8617–8641. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05374-7>
- [59] M.B. Noremylia, Hassan, M. Z., & Ismail, Z. (2022). Recent advancement in isolation, processing, characterization and applications of emerging nanocellulose: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 206, 954–976. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.064>
- [60] Trubetskaya, A., Lê, H. Q., Leppiniemi, J., Koso, T., Välisalmi, T., Linder, M. B., Pisano, I., Dou, J., Leahy, J. J., & Kontturi, E. (2024). Microwave hydrolysis, as a sustainable approach in the processing of seaweed for protein and nanocellulose management. *Algal Research*, 78, 103406. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103406>
- [61] Mesha Mbisana, Ngonye Keroletswe, Nareetsile, F., Dikabo Mogopodi, & Inonge Chibua. (2024). Nanocellulose composites: synthesis, properties, and applications to wastewater treatment. *Cellulose*, 31(18), 10651–10678. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06268-y>
- [62] Bacakova, L., Pajorova, J., Tomkova, M., Matejka, R., Broz, A., Stepanovska, J., Prazak, S., Skogberg, A., Sanna Siljander, & Kallio, P. (2020). Applications of Nanocellulose/Nanocarbon Composites: Focus on Biotechnology and Medicine. *Nanomaterials*, 10(2), 196–196. <https://doi.org/10.3390/nano10020196>
- [63] Oni, B. A., Oziegbe, O., & Olawole, O. O. (2019). Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.12.006>

[64] Biochar for Environmental Management. (2012). In *Routledge eBooks*. Informa. <https://doi.org/10.4324/9781849770552>

[65] Escalante Ariadna, López, G. P., Moreno, C. H., & Etchevers, J. D. (2016). Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 34(3), 367–382. https://www.researchgate.net/publication/320610784_Biocarbon_biochar_I_Nature_history_manufacture_and_use_in_soil

[66] Shafeeyan, M. S., Mohd, W., Houshmand, A., & Shamiri, A. (2010). A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.07.006>

[67] P.R. Yaashikaa, Kumar, P. S., Sunita Varjani, & A. Saravanan. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570–e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>

[68] Heidari, A., Khaki, E., Habibollah Younesi, & Lu, H. R. (2019). Evaluation of fast and slow pyrolysis methods for bio-oil and activated carbon production from eucalyptus wastes using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118394–118394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118394>

[69] Liaw, S. B., & Wu, H. (2015). Tuning Biochar Properties via Partial Gasification: Facilitating Inorganic Nutrients Recycling and Altering Organic Matter Leaching. *Energy & Fuels*, 29(7), 4407–4417. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01020>

[70] Olusola Olaitan Ayeleru, Olawumi Oluwafolakemi Sadare, Idris, A. O., Pandey, S., & Olubambi, P. A. (2024). Introduction to smart nanomaterials for environmental remediation. *Elsevier EBooks*, 3–28. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-21794-4.00008-9>

[71] Gan, Y. X., Jayatissa, A. H., Yu, Z., Chen, X., & Li, M. (2020). Hydrothermal Synthesis of Nanomaterials. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 1–3. <https://doi.org/10.1155/2020/8917013>

- [72] Selvam S, M., & Paramasivan, B. (2022). Microwave assisted carbonization and activation of biochar for energy-environment nexus: A review. *Chemosphere*, 286, 131631. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131631>
- [73] Zoha Heidarinejad, Dehghani, M. H., Heidari, M., Gholamali Javedan, Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- [74] Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., & Spokas, K. (2014). Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(9), 939–969. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180>
- [75] Deng, J., Liu, Y., Gui, S., Yi, Q., & Nie, H. (2024). Nano silver oxide-modified activated carbon as a novel catalyst for efficient removal of bacteria and micropollutants in aquatic environment. *RSC Advances*, 14(41), 30180–30191. <https://doi.org/10.1039/d4ra04604h>
- [76] Asheghmoalla, M., & Mehrab Mehrvar. (2024). Adsorption of a Multicomponent Pharmaceutical Wastewater on Charcoal-Based Activated Carbon: Equilibrium and Kinetics. *Water*, 16(15), 2086–2086. <https://doi.org/10.3390/w16152086>
- [77] Chandra Joshi, H., Dutta, D., Gaur, N., Singh, G. S., Dubey, R., & Dwivedi, S. K. (2022). Silver-doped active carbon spheres and their application for microbial decontamination of water. *Heliyon*, 8(4), e09209. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09209>
- [78] Medina, S. M., Rey, A., Durán-Valle, C., Bahamonde, A., & Faraldos, M. (2021). Performance of Iron-Functionalized Activated Carbon Catalysts (Fe/AC-f) on CWPO Wastewater Treatment. *Catalysts*, 11(3), 337–337. <https://doi.org/10.3390/catal11030337>
- [79] Shu, J., Cheng, S., Xia, H., Zhang, L., Peng, J., Li, C., & Zhang, S. (2017). Copper loaded on activated carbon as an efficient adsorbent for removal of methylene blue. *RSC Advances*, 7(24), 14395–14405. <https://doi.org/10.1039/c7ra00287d>
- [80] Huq, Md. A., Ashrafudoulla, Md., Rahman, M. M., Balusamy, S. R., & Akter, S. (2022). Green Synthesis and Potential Antibacterial Applications of Bioactive Silver Nanoparticles: A Review. *Polymers*, 14(4), 742. <https://doi.org/10.3390/polym14040742>

- [81] Ravindran, A., Chandran, P., & Khan, S. S. (2012). Biofunctionalized silver nanoparticles: Advances and prospects. *Colloids and Surfaces B Biointerfaces*, 105, 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.07.036>
- [82] Silver nanoparticles: aggregation behavior in biorelevant conditions and its impact on biological activity. (2019). *International Journal of Nanomedicine*. <https://doi.org/10.2147/IJN.S185965>
- [83] Liao, C., Li, Y., & Tjong, S. C. (2019). Bactericidal and Cytotoxic Properties of Silver Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2), 449. <https://doi.org/10.3390/ijms20020449>
- [84] Krychowiak-Maśnicka, M., Weronika Wojciechowska, Karolina Bogaj, Aleksandra Bielicka-Giełdoń, Czechowska, E., Ziąbka, M., Narajczyk, M., Kawiak, A., Mazur, T., Szafranek, B., & Aleksandra Królicka. (2024). The Substantial Role of Cell and Nanoparticle Surface Properties in the Antibacterial Potential of Spherical Silver Nanoparticles. *Nanotechnology Science and Applications, Volume 17*, 227–246. <https://doi.org/10.2147/nsa.s489407>
- [85] Wei, L., Lu, J., Xu, H., Patel, A., Chen, Z.-S., & Chen, G. (2014). Silver nanoparticles: synthesis, properties, and therapeutic applications. *Drug Discovery Today*, 20(5), 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2014.11.014>
- [86] Ivask, A., Amro ElBadawy, Chitrada Kaweeteerawat, Boren, D., Fischer, H., Ji, Z., Chang, C. H., Liu, R., Thabet Tolaymat, Telesca, D., Zink, J. I., Cohen, Y., Holden, P. A., & Godwin, H. A. (2013). Toxicity Mechanisms in Escherichia coli Vary for Silver Nanoparticles and Differ from Ionic Silver. *ACS Nano*, 8(1), 374–386. <https://doi.org/10.1021/nn4044047>
- [87] Vanlalveni, C., Lallianrawna, S., Biswas, A., Selvaraj, M., Changmai, B., & Rokhum, S. L. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activities: a review of recent literature. *RSC Advances*, 11(5), 2804–2837. <https://doi.org/10.1039/d0ra09941d>
- [88] Pernas-Pleite, C., Conejo-Martínez, A. M., Marín, I., & Abad, J. P. (2025). Silver Nanoparticles (AgNPs) from *Lysinibacillus* sp. Culture Broths: Antibacterial Activity, Mechanism

Insights, and Synergy with Classical Antibiotics. *Biomolecules*, 15(5), 731–731. <https://doi.org/10.3390/biom15050731>

[89] Zia, Assad, N., Muhammad Naeem-ul-Hassan, Sher, M., Fatema Suliman Alatawi, Mohsen Suliman Alatawi, Omran, E., Jame, Adnan, M., Khan, M. N., Ali, B., Wahab, S., Razak, S. A., Javed, M. A., Kaplan, A., & Rahimi, M. (2023). Aconitum lycoctonum L. (Ranunculaceae) mediated biogenic synthesis of silver nanoparticles as potential antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial and antidiabetic agents. *BMC Chemistry*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s13065-023-01047-5>

[90] Pratama Jujur Wibawa, Nur, M., Mukhammad Asy'ari, Wijanarka Wijanarka, Susanto, H., Sutanto, H., & Nur, H. (2021). Green Synthesized Silver Nanoparticles Immobilized on Activated Carbon Nanoparticles: Antibacterial Activity Enhancement Study and Its Application on Textiles Fabrics. *Molecules*, 26(13), 3790–3790. <https://doi.org/10.3390/molecules26133790>

[15] Zhao, J., Cai, J., Huang, Y., & Luo, J. (2025). Nanocellulose-based carbon sphere immobilized AgNPs for antibacterial cellulosic paper. *Industrial Crops and Products*, 230, 121120–121120. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121120>

[16] Suely Patrícia C. Gonçalves, Strauss, M., Delite, F. S., Clemente, Z., Castro, V. L., & Stéfani, D. (2016). Activated carbon from pyrolysed sugarcane bagasse: Silver nanoparticle modification and ecotoxicity assessment. *The Science of the Total Environment*, 565, 833–840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.041>

Capítulo 3

[91] Thomas, N. C. (1991). The early history of spectroscopy. *Journal of Chemical Education*, 68(8), 631–631. <https://doi.org/10.1021/ed068p631>

[92] Baeten, V., & Dardenne, P. (2002). Spectroscopy: Developments in instrumentation and analysis. *Grasas Y Aceites*, 53(1), 45–63. <https://doi.org/10.3989/gya.2002.v53.i1.289>

[93] Amelinckx, S., van Dyck, D., van Landuyt, J., & van Tendeloo, G. (Eds.). (1996). *Handbook of Microscopy*. <https://doi.org/10.1002/9783527620524>

- [94] Paddock, S. W. (1999). Confocal Laser Scanning Microscopy. *BioTechniques*, 27(5), 992–1004. <https://doi.org/10.2144/99275ov01>
- [95] Thermo Nicolet Corporation. (2001). *Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry*. <https://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Fundamentals/FTIR%20principles.pdf>
- [96] Shimadzu Corporation. (2010). *MOC63u Moisture Analyzer Instruction Manual*. Kyoto, Japón: Shimadzu Corporation. Recuperado de <https://www.shimadzu.com>
- [97] Menczel, J. D., & Prime, R. B. (Eds.). (2008). *Thermal Analysis of Polymers*. <https://doi.org/10.1002/9780470423837>
- [98] Kaliva, M., & Vamvakaki, M. (2020). Nanomaterials characterization. *Elsevier EBooks*, 401–433. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816806-6.00017-0>

Capítulo 4

- [99] S Winarni, M Zainuri, H Endrawati, F Arifan, A Setyawan, & Wangi, A. P. (2021). Analysis proximate of sargassum seaweed sp. *Journal of Physics Conference Series*, 1943(1), 012173–012173. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1943/1/012173>
- [36] López-Sosa, L. B., José Juan Alvarado-Flores, Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J., Alcaraz-Vera, J. V., José Guadalupe Rutiaga-Quñones, Zárate-Medina, J., María Liliana Ávalos-Rodríguez, & Morales-Máximo, M. (2020). A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic Sargassum spp. as a Solid Biofuel Energy Source. *Applied Sciences*, 10(23), 8706–8706. <https://doi.org/10.3390/app10238706>
- [100] Domínguez-Maldonado, J. A., Tapia-Tussell, R., Olguín-Maciel, E., Azcorra-May, K. J., Sauri-Duch, E., Rivera-Muñoz, G., Lizama-Uc, G., & Solís-Pereira, S. E. (2025). Biotic and abiotic interactions during the decomposition of Sargassum spp. from the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 24(3). <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio25514>
- [101] Freile-Pelegrián Yolanda, Daniel, R., Chávez-Quintal Cresencia, Vázquez-Delfín, E., Hugo, P.-C., Gilles, B., & Bourgougnon Nathalie. (2024). Chemical Composition and Carbohydrate Characterization of Beach-Cast Marine Macrophytes from the Mexican Caribbean: Implications

for Potential Bioethanol Production. *Waste and Biomass Valorization*.
<https://doi.org/10.1007/s12649-024-02694-y>

[1] Paredes-Camacho, R. M., González-Morales, S., José Antonio González-Fuentes, Rodríguez-Jasso, R. M., Benavides-Mendoza, A., Charles-Rodríguez, A. V., & Robledo-Olivo, A. (2023). Characterization of *Sargassum* spp. from the Mexican Caribbean and Its Valorization through Fermentation Process. *Processes*, 11(3), 685–685. <https://doi.org/10.3390/pr11030685>

[102] Subramanian Palanisamy, Manoharan Vinosha, Thangapandi Marudhupandi, Periyannan Rajasekar, & Prabhu, N. M. (2017). Isolation of fucoidan from *Sargassum polycystum* brown algae: Structural characterization, in vitro antioxidant and anticancer activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 405–412. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.182>

[103] Salem, D. M. S. A., & Ismail, M. M. (2021). Characterization of cellulose and cellulose nanofibers isolated from various seaweed species. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 48(4), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.11.001>

[21] L. Chávez-Guerrero, A. Toxqui-Terán, & O. Pérez-Camacho. (2021). One-pot isolation of nanocellulose using pelagic *Sargassum* spp. from the Caribbean coastline. *Journal of Applied Phycology*, 34(1), 637–645. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02643-5>

[104] Salem, D. M. S. A., & Ismail, M. M. (2021). Characterization of cellulose and cellulose nanofibers isolated from various seaweed species. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 48(4), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.11.001>

[105] Doh, H., Lee, M. H., & Whiteside, W. S. (2019). Physicochemical characteristics of cellulose nanocrystals isolated from seaweed biomass. *Food Hydrocolloids*, 102, 105542–105542. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105542>

[106] Liu, Z., Li, X., Xie, W., & Deng, H. (2017). Extraction, isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from industrial kelp (*Laminaria japonica*) waste. *Carbohydrate Polymers*, 173, 353–359. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.079>

- [107] Aravindhan, R., Raghava Rao, J., & Unni Nair, B. (2009). Preparation and characterization of activated carbon from marine macro-algal biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 688–694. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.083>
- [108] Solís-Fuentes, J. A., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R. C., & Durán-de-Bazúa, M. D. C. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 27(1), 36-48.
- [109] Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A., & Bras, J. (2012). Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate Polymers*, 90(2), 735–764. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.026>
- [110] Xu, Y., Xu, Y., Chen, H., Gao, M., Yue, X., & Ni, Y. (2022). Redispersion of dried plant nanocellulose: A review. *Carbohydrate Polymers*, 294, 119830. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119830>
- [68] Biochar for Environmental Management. (2012). In *Routledge eBooks*. Informa. <https://doi.org/10.4324/9781849770552>
- [111] Abbas, R., Luo, J., Qi, X., Naz, A., Khan, I. A., Liu, H., Yu, S., & Wei, J. (2024). Silver Nanoparticles: Synthesis, Structure, Properties and Applications. *Nanomaterials*, 14(17), 1425. <https://doi.org/10.3390/nano14171425>
- [112] Chávez-Guerrero, L., Silva-Mendoza, J., Toxqui-Terán, A., Vega-Becerra, O. E., Salinas-Montelongo, J. A., & Pérez-Camacho, O. (2021). Direct observation of endoglucanase fibrillation and rapid thickness identification of cellulose nanoplatelets using constructive interference. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117463. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117463>
- [113] Peniche-Pavía, H. A., Tzuc-Naveda, J. D., Rosado-Espinosa, L. A., & Collí-Dulá, R. C. (2024). FTIR-ATR chemometric analysis on pelagic Sargassum reveals chemical composition changes induced by cold sample transportation and sunlight radiation. *Journal of Applied Phycology*, 36(3), 1391–1405. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03167-w>
- [114] Oliveira, R. C., Hammer, P., Guibal, E., Jean-Marie Taulemesse, & Garcia, O. (2013). Characterization of metal–biomass interactions in the lanthanum(III) biosorption on Sargassum

sp. using SEM/EDX, FTIR, and XPS: Preliminary studies. *Chemical Engineering Journal*, 239, 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.042>

[115] Ranguin, R., Delannoy, M., Yacou, C., Jean-Marius, C., Feidt, C., Rychen, G., & Gaspard, S. (2021). Biochar and activated carbons preparation from invasive algae *Sargassum* spp. for Chlordecone availability reduction in contaminated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105280. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105280>

[116] Obie Farobie, Apip Amrullah, Asep Bayu, Novi Syaftika, Anis, L. A., & Edy Hartulistiyoso. (2022). In-depth study of bio-oil and biochar production from macroalgae *Sargassum* sp. via slow pyrolysis. *RSC Advances*, 12(16), 9567–9578. <https://doi.org/10.1039/d2ra00702a>

[117] Song, G., Guo, Y., Li, G., Zhao, W., & Yu, Y. (2019). n of tetracycline and cefradine using biochar derived from seaweed *Sargassum* sp. *Desalination and Water Treatment*, 160, 316–324. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24333>

[118] JOSEPH, S. R., SANDRA, H. T. P., NAIR, A., CHANDRAN, S. A., & USHAMANI, M. (2023). CELLULOSE NANOCRYSTALS FROM SUGARCANE BAGASSE: ISOLATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION. *Cellulose Chemistry and Technology*, 57(1-2), 37–47. <https://doi.org/10.35812/cellulosechemtechnol.2023.57.04>

[21] L. Chávez-Guerrero, A. Toxqui-Terán, & O. Pérez-Camacho. (2021). One-pot isolation of nanocellulose using pelagic *Sargassum* spp. from the Caribbean coastline. *Journal of Applied Phycology*, 34(1), 637–645. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02643-5>

[119] Roche, S., Yacou, C., Jean Marius, C., Ranguin, R., Francoeur, M., Taberna, P.-L., Passe-Coutrin, N., & Gaspard, S. (2023). Carbon Materials Prepared from Invading Pelagic *Sargassum* for Supercapacitors' Electrodes. *Molecules*, 28(15), 5882. <https://doi.org/10.3390/molecules28155882>

[120] Ross, A. B., Anastasakis, K., Kubacki, M., & Jones, J. M. (2009). Investigation of the pyrolysis behaviour of brown algae before and after pre-treatment using PY-GC/MS and TGA. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1-2), 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.004>

- [121] Soroush, S., Ronsse, F., Verberckmoes, A., Verpoort, F., Park, J., Wu, D., & Heynderickx, P. M. (2022). Production of solid hydrochar from waste seaweed by hydrothermal carbonization: effect of process variables. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(1), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02365-9>
- [122] Eltaweil, A. S., Abdelfatah, A. M., Hosny, M., & Fawzy, M. (2022). Novel Biogenic Synthesis of a Ag@Biochar Nanocomposite as an Antimicrobial Agent and Photocatalyst for Methylene Blue Degradation. *ACS Omega*, 7(9), 8046–8059. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07209>
- [123] Freitas, J. C. C., Emmerich, F. G., Cernicchiaro, G. R. C., Sampaio, L. C., & Bonagamba, T. J. (2001). Magnetic Susceptibility Effects on ^{13}C MAS NMR Spectra of Carbon Materials and Graphite. *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 20(1-2), 61–73. <https://doi.org/10.1006/snmr.2001.0030>
- [124] Arnold, A. A., Genard, B., Zito, F., Tremblay, R., Warschawski, D. E., & Marcotte, I. (2014). Identification of lipid and saccharide constituents of whole microalgal cells by ^{13}C solid-state NMR. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1848(1), 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2014.07.017>
- [125] McBeath, A. V., Smernik, R. J., Krull, E. S., & Lehmann, J. (2014). The influence of feedstock and production temperature on biochar carbon chemistry: A solid-state ^{13}C NMR study. *Biomass and Bioenergy*, 60, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.002>
- [126] Li, X., Shen, Q., Zhang, D., Mei, X., Ran, W., Xu, Y., & Yu, G. (2013). Functional Groups Determine Biochar Properties (pH and EC) as Studied by Two-Dimensional ^{13}C NMR Correlation Spectroscopy. *PLoS ONE*, 8(6), e65949–e65949. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065949>
- [127] Happs, R. M., Harman-Ware, A. E., Ben, H., & Ferrell III, J. R. (2021). *Determination of Carbon Functional Groups in Pyrolysis Bio-Oils using ^{13}C NMR. Laboratory Analytical Procedure (LAP), Issue Date: October 7, 2021.*
- [128] Freitas, J. C. C., Cipriano, D. F., Zucolotto, C. G., Cunha, A. G., & Emmerich, F. G. (2016). Solid-State ^{13}C NMR Spectroscopy Applied to the Study of Carbon Blacks and Carbon Deposits

Obtained by Plasma Pyrolysis of Natural Gas. *Journal of Spectroscopy*, 2016, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2016/1543273>

[129] Feng, Q., Fan, B., & He, Y.-C. (2024). Antibacterial, antioxidant, Cr(VI) adsorption and dye adsorption effects of biochar-based silver nanoparticles-sodium alginate-tannic acid composite gel beads. *International Journal of Biological Macromolecules*, 271, 132453–132453. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132453>

[130] ŻAROWSKA, B., TOMASZ KOŹLECKI, MICHAŁ PIEGZA, KATARZYNA JAROSKOŹLECKA, & ROBAK, M. (2019). New Look on Antifungal Activity of Silver Nanoparticles (AgNPs). *Polish Journal of Microbiology*, 68(4), 515–525. <https://doi.org/10.33073/pjm-2019-051>

[131] Eltaweil, A. S., Abdelfatah, A. M., Hosny, M., & Fawzy, M. (2022). Novel Biogenic Synthesis of a Ag@Biochar Nanocomposite as an Antimicrobial Agent and Photocatalyst for Methylene Blue Degradation. *ACS Omega*, 7(9), 8046–8059.

Capítulo 7.

Apéndice.

Apéndice 1.

Los arribazones se han presentado de manera masiva y con más frecuencia en toda esta zona, a pesar de los intentos del gobierno federal, el gobierno de Quintana Roo e inclusive algunos sectores empresariales por tratar esta problemática. Una alternativa inmediata ante esta situación ha sido mediante protocolos de limpieza (remoción del material); sin embargo, han sido ineficientes, debido a que en la mayoría de los casos se maneja el sargazo como un desecho y no como una posible materia prima para su aprovechamiento [5].

A pesar de que se han desarrollado distintos organismos que monitorean y describen la evolución del sargazo, centrándose en la recolección de datos a partir de satélites de alta resolución sobre como el efecto de los vientos y oleajes depositan el sargazo a lo largo de la costa, procesos de

erosión tanto del desecho de sargazo como del uso de maquinaria para su recolección, y lixiviados contaminantes (metales pesados y gases) [8].

Actualmente, la mayor estrategia para su gestión sigue siendo la remoción y la investigación de su comportamiento para propósitos de limpieza o restauración de la zona. Por lo que existe un bajo índice en cuanto al número de investigadores o empresarios inclinados a utilizar el sargazo como materia prima, ya sea con propósitos de investigación escalable o inversión [9-10]. En la **Figura 1.2** se muestra un estimado en la cantidad de productos que podrían potencialmente desarrollarse a partir de una tonelada métrica (1000 kg) de sargazo fresco [7].

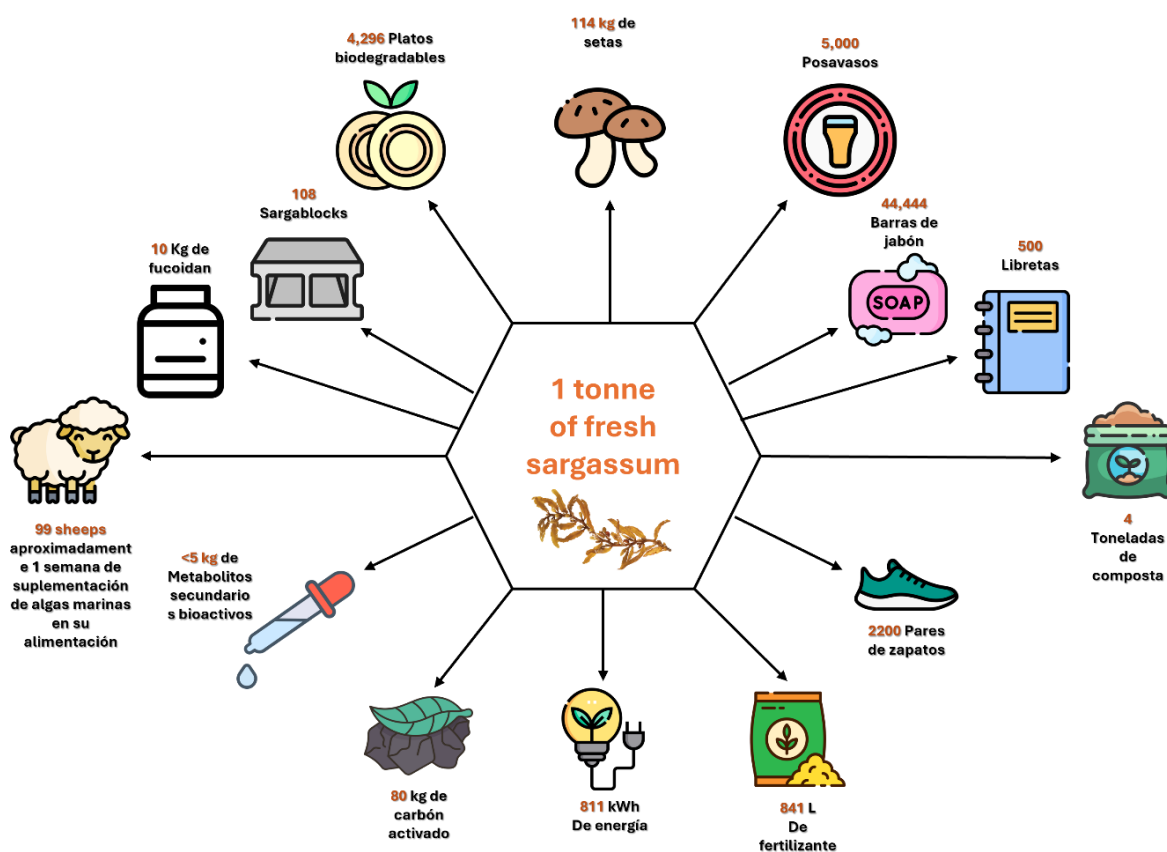


Figura 1.2 Relación en cuanto a la cantidad de biomasa de sargazo fresco para la potencial generación de productos.

Readaptado de Speede et al., 2024.

Apéndice 2.

Estudios sugieren el uso de la nanocelulosa y el carbón activado como materiales base para el desarrollo de nanocompuestos basados en nanopartículas metálicas, como las de plata (AgNPs). *Toro et al., 2021* [13] fabricaron un nanocompuesto a base de plata utilizando nanocelulosa cristalina, el cual demostró una fuerte

actividad antibacteriana contra *E. coli* y una citotoxicidad in vitro significativa contra una línea celular (fibroblastos embrionarios NIH-3T3). *Attasith Parnsubsakul et al.*, 2020 [14] desarrollaron un sustrato SERS biodegradable y flexible basado en nanocelulosa bacteriana compuesto con AgNPs para la detección rápida de pesticidas en las cáscaras de frutas. *Zhao et al.*, 2025 [15] mostró que las esferas de carbono de nanocelulosa cristalina utilizadas como portadores para las AgNPs mejoraron tanto las propiedades mecánicas del material como la prolongación en su eficacia antimicrobiana, impidiendo el crecimiento de bacterias como *E. coli* y *S. aureus*. Lo que demuestra la efectividad en cuanto a este tipo de nanocompuestos. *Suely Patrícia C. Gonçalves et al.*, 2016 [16] demostró que el carbón activado a partir de bagazo de caña de azúcar pirolizado impregnado con nanopartículas de plata inhibió el crecimiento bacteriano (*Escherichia Coli*), lo cual, promueve el desarrollo de materiales eficientes para las tecnologías de remediación ambiental. Sin embargo, en las últimas décadas, un bajo número de especies son las que se han investigado químicamente a un nivel crítico. Esto es debido a que el género *Phaeophyceae* del sargazo es considerado uno de los más complejos. A pesar de sus característicos beneficios, la gran diversidad en sus distintas especies y complejidad química precisa de una evaluación sistemática y crítica en cuanto a su investigación y aprovechamiento. Otro aspecto importante es con respecto a los procesos de pretratamiento del alga; en la literatura actual, estos incluyen suspensiones de ácido clorhídrico, metanol, hidróxido de sodio, etanol, entre otros. Así mismo, para la etapa de extracción de nanocelulosa, la hidrólisis ácida sigue siendo una de las opciones más utilizadas, permitiendo tener un control de tamaño y estructura con respecto a la concentración del ácido y el tiempo de reacción. No obstante, en la mayoría de estudios se siguen utilizando altas cantidades de ácido sulfúrico, así como tiempos y temperaturas prolongadas, haciendo poco rentable su escalabilidad a procesos industriales y generando una cuantía significativa de residuos dañinos [17-20]. Estudios recientes han propuesto el uso de ácidos menos fuertes para reducir las cantidades de ácido sulfúrico, logrando la obtención de nanocelulosa cristalina [21]. Sin embargo, no se tiene un estándar sobre el aprovechamiento eficiente de este tipo de alternativas, que permitan un óptimo control de reactivos y tiempos de tratamiento manteniendo la calidad, así como las propiedades físicas y químicas de la nanocelulosa obtenida, y su posible escalabilidad y adaptabilidad a procesos industriales. Así mismo, el control en la formación de carbón activado a partir de nanocelulosa depende de una serie de factores que necesitan ser optimizados para evitar residuos como sales o grupos fenoles.

Apéndice 3.

Microscopía electrónica de barrido (SEM).

El microscopio electrónico de barrido (**Figura 3.5**), es un dispositivo de mapeo, en el cual la muestra es sondeada por una emisión de electrones que se escanea sobre su superficie. Las radiaciones del espécimen son estimuladas por el haz incidente, detectadas, amplificadas y utilizadas para modular el brillo de un segundo haz de electrones que se escanea sinérgicamente con el primer haz, a través de una pantalla de tubos de rayos catódicos.

El sistema se divide principalmente en dos categorías, el apartado óptico/electrónico y los sistemas de detección. En el sistema óptico/electrónico se destaca la fuente de electrones, producidos ya sea termoiónicamente (cátodos de tungsteno o hexaboruro de lantano) o de una fuente de emisión de campo. Dichos electrones son acelerados a una energía típica entre los 500 eV a 30 keV. Así mismo, el flujo de electrones se enfoca en el espécimen (usualmente recubierto con una capa conductora) a través de una serie de lentes electromagnéticas, una vez que los electrones impactan en la superficie, producen una serie de señales de electrones secundarios y retro dispersados que son detectadas por sensores para crear una imagen detallada de la topografía y composición de la muestra [93].

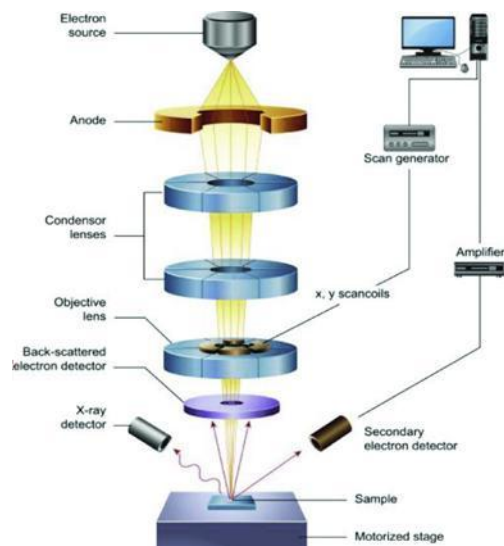


Figura 3.5 Microscopio electrónico de barrido Hitachi SU8020 (izquierda) y esquema general de funcionamiento (derecha).

Microscopia de láser confocal (LSM).

La microscopia láser confocal (**Figura 3.6**) utiliza un láser para concentrar un solo punto de la muestra a través de una lente objetiva. La luz que regresa de esa área pasa por un pequeño orificio denominado “pinhole” ubicado en un plano óptico conjugado frente al detector, el cual bloquea toda luz proveniente de planos fuera del foco, eliminando así la información desenfocada y mejorando el contraste y la resolución de la imagen. Dicho láser, escanea la muestra de manera secuencial y concentrada, obteniendo imágenes de diferentes planos focales, permitiendo la reconstrucción de imágenes en 2 o 3 dimensiones con alta nitidez y profundidad óptica controlada [94].

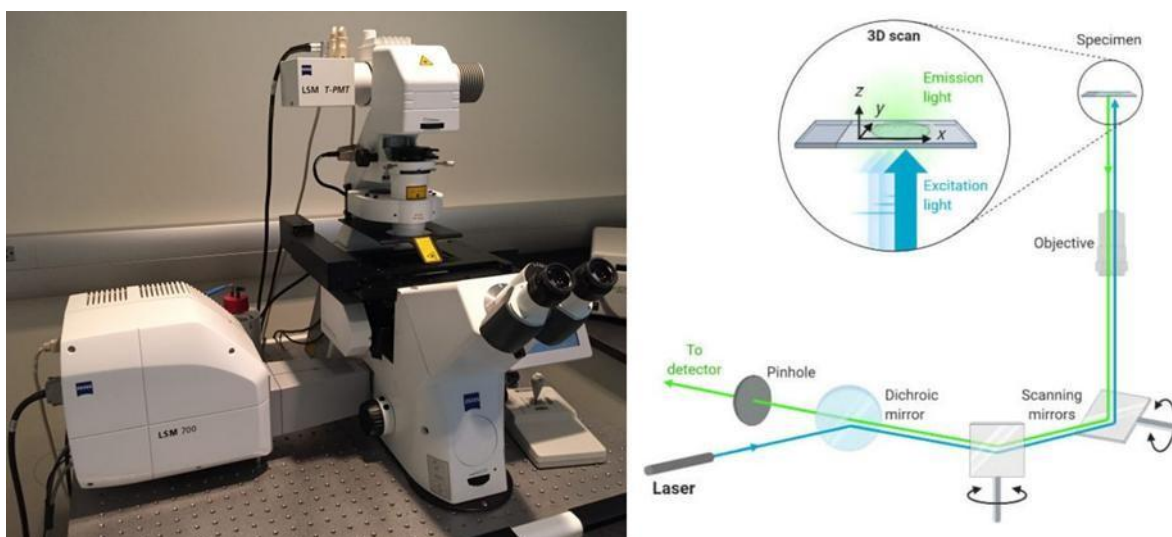


Figura 3.6 Microscopio láser confocal ZEISS LSM 700 (izquierda) y esquema general de funcionamiento (derecha).

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).

La espectroscopia infrarroja se basa en la interacción de la radiación infrarroja con las moléculas, generando vibraciones específicas que permiten inferir la presencia o ausencia de ciertos grupos funcionales. La radiación infrarroja es en gran parte energía térmica. Los enlaces específicos responden (absorben) a frecuencias específicas. Por lo que, la exposición de una muestra a la luz infrarroja da lugar a la absorción de algunas frecuencias, mientras que otras son transmitidas y una pequeña parte resulta reflejada.

El espectro de infrarrojo es una gráfica que muestra la relación entre las frecuencias absorbidas o transmitidas y la intensidad de ese proceso. Las frecuencias se representan en el eje horizontal en números de onda (cm^{-1}), mientras que la intensidad se indica en el eje vertical como porcentaje.

Es básicamente un gráfico de las frecuencias transmitidas (o absorbidas) frente a la intensidad de la transmisión (o absorción). Las frecuencias aparecen en el eje x en unidades de centímetros inversos (números de onda) y las intensidades se trazan en el eje y en unidades porcentuales (**Figura 3.7**) [95].

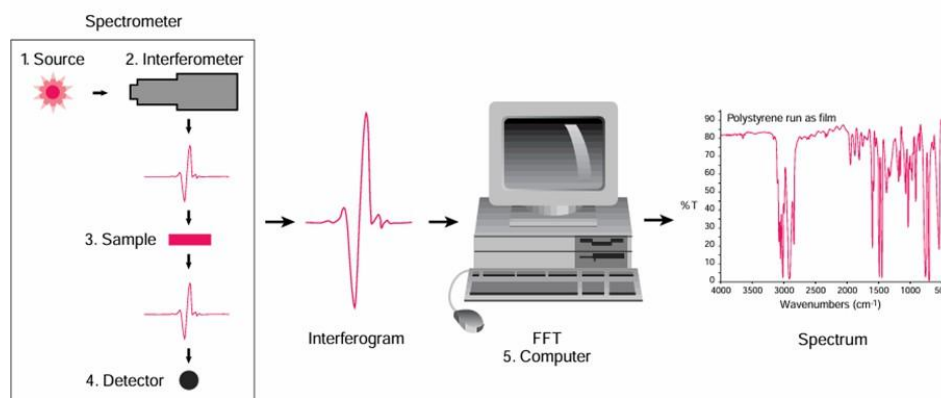


Figura 3.7 Principio de funcionamiento del equipo de FT-IR y espectro FT-IR. Tomado de (Thermo Nicolet Corporation, 2001).

Analizador de humedad.

El MOC63u de Shimadzu (**Figura 3.8**) es un analizador de humedad diseñado para medir con precisión el contenido de humedad. Cuenta con un calentador halógeno de larga duración que permite realizar mediciones rápidas y precisas, con un rango de temperatura de 50 a 200 grados Celsius. El dispositivo tiene una capacidad de 60 g con una legibilidad de 0.02 g. El MOC63u es adecuado para diversas aplicaciones de control de calidad, ya que mejora la eficiencia del trabajo al adaptarse a diferentes materiales [96].

El equipo de analizador de humedad funciona midiendo la pérdida de peso de la muestra al ser secada con una lámpara halógena, dando como resultado el contenido de humedad de manera rápida precisa.



Figura 3.8 Analizador de humedad por secado de halógeno Shimadzu MOC63u.

Análisis termogravimétrico (TGA).

El análisis termogravimétrico (**Figura 3.9**) es una técnica térmica utilizada que mide la masa de un material a lo largo del tiempo con respecto a una temperatura cambiante a una velocidad constante, permitiendo determinar su composición química y predecir la estabilidad térmica. En dicha técnica, un gas inerte (nitrógeno, argón o helio) fluye a través de la balanza, permitiendo purgar y crear una atmosfera adecuada que no interactúa con el proceso. Así mismo, se establece un rango de temperatura gradual, ya sea lineal, por etapas o constante (depende del estudio a realizar). Durante el proceso de calentamiento, el equipo registra la variación de masa en la muestra, la corresponde a la descomposición o volatilización de componentes. Finalmente se obtiene información de masa con respecto a temperatura o tiempo, mismas que permiten generar curvas termogravimétricas (TG), así como (DTG) [97].



Figura 3.9 Equipo de análisis termogravimétrico (TGA).

Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN).

La espectroscopia de resonancia magnética nuclear (**Figura 3.10**) está basada en la interacción de la radiación electromagnética de radiofrecuencia (MHz) con los núcleos de los átomos inmersos en un campo magnético considerable. Su enfoque principal está basado en las propiedades magnéticas de los núcleos de los átomos, en donde se encuentran principalmente partículas subatómicas como electrones, protones y neutrones; por efecto de la circulación de carga a partir del giro de sus ejes cargados positivamente, este genera un dipolo magnético a lo largo de la dirección del eje de giro. Cada orientación corresponde a un nivel de energía que está señalado por un número cuántico magnético “m” ($m = -Y_0$ a $+Y_0$).

La radiación emitida de una muestra analizada en un campo magnético con ondas de radio (MHz) hace que los núcleos absorban energía, lo que deriva en que cambien la orientación de los espines nucleares del estado del espín de baja energía al estado de espín de alta energía.

La absorción de energía ocurre cuando la frecuencia de la radiación coincide (resuena) con la frecuencia de precisión. Una vez eliminado el campo aplicado, los núcleos se relajan de nuevo a su estado de energía más bajo, liberando la energía adicional. Esta energía se registra para obtener los espectros característicos de huellas dactilares de una molécula determinada [98].



Figura 3.10. Equipo de resonancia magnética nuclear Bruker 500 MHz modelo Avance III.

La caracterización del sargazo, el biocarbón de control y el biocarbón AgNPs/AC se llevó a cabo mediante RMN ^{13}C a temperatura ambiente en un espectrómetro Bruker 500 MHz modelo Avance III equipado con una sonda de estado sólido (**Figura 3.10**).