



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN NANOCIENCIAS Y MATERIALES

**Estudio de las Propiedades de Especies Invasoras Vegetales
para su Aprovechamiento en el Desarrollo de Materiales
Sustentables**

Tesis que presenta

Daniel Esteban Camacho Martínez

Para obtener el grado de

Maestro en Nanociencias y Materiales

Director de la Tesis:

Dr. Armando Encinas Oropesa



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis **Estudio de las Propiedades de Especies Invasoras Vegetales para su Aprovechamiento en el Desarrollo de Materiales Sustentables** presentada para obtener el Grado de de Maestro en Nanociencias y Materiales fue elaborada por **Daniel Esteban Camacho Martínez** y aprobada el **5 de julio del 2020** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Armando Encinas Oropesa
(Director de la tesis)

Dra. Natalia Martínez Tagüeña
(Asesor de la tesis)

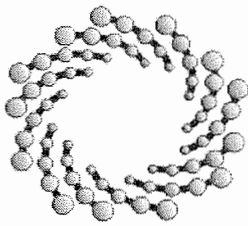
Dra. Elizabeth Alvarado Gómez
(Asesor de la tesis)



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Armando Encinas Oropesa.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (873661) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 064 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Nanociencias y Materiales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 17 días del mes de julio del año 2020, se reunió a las 15:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dra. Natalia Martínez Tagüeña	Presidenta	IPICYT
Dr. Elizabeth Alvarado Gómez	Secretaria	IPICYT
Dr. Armando Encinas Oropesa	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN NANOCIENCIAS Y MATERIALES

sustentó el C.

Daniel Esteban Camacho Martínez

sobre la Tesis intitulada:

Estudio de las Propiedades de Especies Invasoras Vegetales para su Aprovechamiento en el Desarrollo de Materiales Sustentables

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. Armando Encinas Oropesa

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 16:30 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 17 días del mes de julio de 2020.


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



Dedicatoria

A mi familia que siempre me han apoyado para seguir mis sueños y ambiciones.

A mis amigos porque escuchan siempre que les explico algo que no les interesa tanto pero a mi me emociona.

A mi asesor que siempre tiene disposición, tiempo y apoyo para ideas por mas locas que suenan.

Y a todos los que se tomen el tiempo de leer este trabajo...

Agradecimientos

Comité Tutoral por el tiempo que han dedicado para revisar la tesis y sus valiosos comentarios.

A la empresa TEMA, Servicios y productos Ambientales S.A. de C.V., quien nos proporcionó las muestras de lirio acuático utilizadas en el presente trabajo.

Al Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN), por facilitar el acceso y uso de la infraestructura experimental. En particular, se agradece a la M. C. Ana Iris Peña por su apoyo técnico en el SEM y a M.C. Beatriz Rivera por su apoyo en los rayos X.

Al Dr. Emilio Muñoz Sandoval por su apoyo para realizar las mediciones de TGA, así como al Dr. Vicente Rodríguez y a Domingo Trujillo por su apoyo para las mediciones de espectroscopía infrarroja.

A CONACYT e IPICYT.

Índice general

Constancia de aprobación de la tesis	III
Créditos Institucionales	V
Agradecimientos	XI
Resumen	XXII
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema de estudio	3
2.1. Definición del problema de estudio	3
2.2. Justificación	4
2.3. Hipótesis	8
2.4. Objetivo General	8
2.4.1. Objetivos Específicos	8

2.5. Metodología	9
3. Marco Teórico	10
3.1. Aplicaciones y procesos propuestos	10
3.1.1. Separación de aceite en agua	10
3.1.2. Materiales compuestos	11
3.1.3. Alteración de propiedades de materiales con nanoestructuras	15
3.2. Especies vegetales invasoras	16
3.2.1. Estudio específico: sargazo y lirio acuático.	17
3.2.2. Sargazo	17
3.2.3. Lirio Acuático	20
4. Materiales y métodos	23
4.1. Caracterización elemental	23
4.1.1. Microscopía electrónica de barrido	24
4.1.2. Análisis termogravimétrico	26
4.1.3. Difracción de rayos X	27
4.1.4. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier	29
4.2. Obtención de muestras	30

4.3.	Procesos de transformación	31
4.3.1.	Síntesis de nanopartículas en estructuras vegetales	32
4.3.2.	Moldeo	33
4.3.3.	Funcionalización	33
4.3.4.	Filtros	34
4.3.5.	Compósitos	35
5.	Resultados	36
5.1.	Resultados de la caracterización elemental.	36
5.1.1.	Microscopía electrónica de barrido	36
5.1.2.	Análisis termogravimétrico	37
5.1.3.	Difracción de rayos X	39
5.1.4.	Espectroscopía infrarroja	39
5.2.	Procesos de transformación	42
5.2.1.	Plantas invasoras con nanopartículas metálicas	42
5.2.2.	Moldeo	46
5.2.3.	Funcionalización	46
5.2.4.	Compósitos	46

5.2.5. Filtros	47
5.3. Valoración del enfoque sustentable de los procesos de transformación . . .	52
5.3.1. Recapitulación de aplicaciones y procesos de transformación	52
5.3.2. Valoracion de los procesos de transformación aplicados.	55
6. Conclusiones	57
6.1. Perspectivas	58
A. Proceso del uso de los filtros	59
B. Tablas de bandas relevantes de espectros infrarrojos	61

Índice de figuras

2.1. Póster de objetivos de desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas [1].	6
2.2. Resumen de actividades y técnicas aplicadas durante el estudio.	9
3.1. Diagrama cadena de poliestireno.	13
3.2. Ejemplos de aplicaciones del poliestireno.	14
3.3. Mapa señalado con la región del mar de los sargazos.	19
3.4. Aplicaciones conocidas del sargazo durante su ciclo de vida [2, 3, 4, 5, 6, 7].	20
3.5. Aplicaciones conocidas del lirio acuático durante su ciclo de vida [8, 9, 10, 11, 12].	22
4.1. Ejemplos de imágenes de plantas tomadas por SEM; a) Imagen SEM de fibras de lirio acuático lavadas [8], b) Imágenes SEM recubiertas con osmio de macroalgas marinas secas tras una limpieza en NaCl al 3.5 % por 10 min y mantenido a un desecador al vacío por 24 h. [13].	25
4.2. Ejemplos de curva TG del lirio acuático [8].	27
4.3. Ejemplo de patrón de difracción de rayos X del lirio acuático nativo y preparado con H ₂ SO ₄ [14].	28

4.4. Esquema simplificado de un espectrómetro infrarrojo por transformada de fourier. [15]	30
4.5. Ejemplos de espectros infrarrojos de sargazo utilizado para absorber Cadmio. Los espectros corresponden al sargazo prístino y al sargazo con cadmio absorbido [6].	31
4.6. Fotografía de sargazo recolectado y seco.	31
4.7. Fotografía de Lirio Acuático seco y en trozos que fue proporcionado por la empresa TEMA.	32
4.8. Diagrama del proceso de coprecipitación de sales de hierro en presencia del lirio acuático.	33
4.9. Diagrama del proceso de moldeo.	34
4.10. Diagrama del proceso de funcionalización del sargazo/lirio acuático con barniz de poliestireno.	34
4.11. Diagrama del proceso de fabricación de los compósitos.	35
5.1. Micrografía por electrones retrodispersados de la hoja de sargazo.	37
5.2. Micrografía por electrones retrodispersados del lirio acuático.	37
5.3. Análisis termogravimétricos del sargazo: a) curva original, b) derivada de la curva original.	38
5.4. Análisis termogravimétricos del lirio acuático: a) curva original, b) derivada de la curva original.	38
5.5. Difractogramas de rayos X de: a) la planta de sargazo y b) la planta de lirio acuático.	39
5.6. Espectro infrarrojo del sargazo recubierto con poliestireno reciclado.	40

5.7. Espectro infrarrojo del lirio acuático recubierto con poliestireno reciclado. . .	41
5.8. Fotos de: a) 1.-lirio acuático con partículas metálicas y 2.- lirio prístino. b) sargazo magnético	43
5.9. Micrografía por electrones retrodispersados del lirio acuático, con aumento a aglomerado de partículas metálicas.	44
5.10. Micrografía por electrones retrodispersados del lirio acuático con nanopartículas metálicas	45
5.11. Micrografía por electrones retrodispersados de la macroalga de sargazo con nanopartículas metálicas.	46
5.12. Micrografía por electrones retrodispersados de la planta de sargazo, se observan las regiones donde existe una mayor acumulación de metales.	47
5.13. Espectros de energía dispersiva (EDS) de las muestras de lirio acuático y sargazo magnetizadas.	48
5.14. Fotografía de las muestras moldeadas: a) lirio acuático y b) sargazo reformado	49
5.15. Micrografía por electrones restrodispersados de hoja de poliestireno recubierto de poliestireno reciclado.	49
5.16. Fotografías de la planta de sargazo a) reformada por medio del moldeo, b) recubierto de poliestireno reciclado y c) compósito de sargazo y poliéster	50
5.17. Cortes transversales de: a) compósito de sargazo recubierto con poliestíreno reciclado y b) compósito de sargazo sin recubrimiento.	50
5.18. Filtro de lirio recubierto separando aceite de agua.	51
5.19. Diagrama de valorización de las aplicaciones y procesos propuestos.	55
A.1. Proceso de filtrado del lirio acuático	60

B.1. Tablas de picos de espectro infrarrojo del poliestireno	62
B.2. Tablas de picos de espectro infrarrojo del lirio acuático	63
B.3. Tablas de picos de espectro infrarrojo del sargazo	64

Resumen

El aprovechamiento de los recursos naturales de manera inconsciente durante los últimos 50 años nos ha llevado a una crisis ambiental nunca antes vista. Por este motivo se realizan grandes esfuerzos para concientizar a la población sobre el uso adecuado de los recursos naturales. Sin embargo, para poder mantener la calidad de vida que existe es necesario realizar concesiones y buscar un equilibrio en la explotación de los recursos que disponemos. De esta forma en este trabajo se plantea la utilización de las especies vegetales invasoras, lirio acuático y sargazo, como un recurso natural renovable y abundante para su uso como materia prima en la elaboración de productos de utilidad. A partir de muestras secas de cada una de estas plantas se realizó una caracterización elemental por medio de microscopía electrónica de barrido, análisis termogravimétrico, difracción de rayos X y finalmente con espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier. Posteriormente se implementaron procesos para desarrollar diferentes aplicaciones. Por medio de una reformación mecánica de las especies vegetales y un proceso de funcionalización se realizaron filtros para separación de aceite en agua y compósitos con una matriz de poliéster. Por último, se llevó a cabo la síntesis de nanopartículas metálicas dentro de las estructuras vegetales para dotarlas con diferentes propiedades, específicamente se crecieron nanopartículas de magnetita para hacer las plantas magnéticas.

Palabras clave: Lirio acuático, sargazo, recursos renovables abundantes, materiales funcionales.

Capítulo 1

Introducción

Actualmente se utilizan una gran cantidad de materia prima de fuentes no renovables. Los productos de estas fuentes suelen tener un tiempo de vida aprovechable, tras lo cual estos terminan siendo desechados. Algunos cuantos tienen la posibilidad de volver a ser reutilizados pero en su gran mayoría no. Necesitamos fuentes que en principio no se agoten, es decir encontrar alternativas que permitan una explotación constante y sustentable. En principio, las alternativas a estos materiales pueden encontrarse en la naturaleza. Sin embargo, los recursos naturales renovables suelen tener algunas limitantes en cuanto a las capacidades de explotación, ya que las facultades de reposición del recurso pueden verse superadas por la demanda del producto. Los recursos naturales renovables que se utilicen como materia prima deben ser abundantes, de modo que es probable que provengan de fuentes que tengan poco valor o bien sean un desecho. De entre todas las opciones de recursos naturales renovables abundantes existentes abordamos la posibilidad de tomar como fuente las especies invasoras, las cuales cumplen con la característica de crecer en abundancia, lo que suele provocar serios problemas que pueden ser socioeconómicos o ecológicos.

El interés de este estudio fue el de desarrollar diferentes metodologías para conseguir aprovechar especies vegetales invasivas como materia prima, dentro de este estudio nos limitamos al sargazo y lirio acuático, de manera que éstas se vuelvan una fuente de recursos renovables explotables. Con la meta de contribuir a reducir el problema que éstas generan en el medio ambiente donde se localizan. Para mostrar su versatilidad en el cuadro 1.1 se observan aplicaciones conocidas del lirio acuático y del sargazo, mostrando su valor de utilidad con potencial de ser un material de alto valor agregado.

Para conocer las propiedades fisicoquímicas del sargazo y del lirio acuático se realizó una caracterización, en la que se incluían técnicas como la microscopía electrónica de barrido, el análisis termogravimétrico, la difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja por

Aplicación	Referencia lirio acuático	Referencia sargazo
Carbinozación (derivados de carbón)	[11, 16]	[4, 17]
Insumos agroindustriales	[10, 12, 18]	[3, 5, 19]
Materiales compuestos	[16, 18, 20]	[17, 21]
Extracción de fibras	[8, 18, 20, 22]	
Producción de bioplásticos	[22, 23]	[3, 24, 25]
Producción de biocombustibles	[26, 27]	[3, 19, 28]
Producción de fármacos		[2, 3]
Remediación ambiental	[10, 29]	[4, 6, 7]

Cuadro 1.1: Aplicaciones conocidas de lirio acuático y sargazo.

transformada de Fourier. Con los resultados obtenidos se procedió a realizar el crecimiento de nanopartículas metálicas en la estructuras de las plantas, de modo que se modificaron las propiedades de las muestras vegetales. Se consiguió modificar la conformación de las plantas utilizadas por medio de un moldeo mecánico. A través de una funcionalización superficial con el reciclaje de poliestireno se modificó la compatibilidad de las muestras, lo que permitió fabricar compósitos plásticos y filtros de separación de aceite en agua.

El estudio realizado esta dividido en planteamiento del problema, marco teórico donde se profundiza en los temas relevantes a las aplicaciones propuestas, así como al sargazo y el lirio acuático, desarrollo de materiales y métodos en donde se presentan las técnicas de caracterización realizadas, presentación de los resultados así como una discusión de estos, análisis de la metodología realizada, y por último, las conclusiones alcanzadas y perspectivas a realizar.

Capítulo 2

Planteamiento del problema de estudio

2.1. Definición del problema de estudio

El desarrollo de la humanidad lleva implícitamente el consumo de materiales como materia prima para la fabricación de bienes. Durante mucho tiempo, se ha trabajado para poder contar con materia prima accesible y barata. La manera usual de considerar la materia prima implicaba, lo que la economía circular llama el modelo lineal de explotación, en el cual la materia prima se usa, se transforma en un producto, se usa y finalmente se desecha. La disponibilidad de la materia prima nunca fue considerada como un problema. Más recientemente el problema de la disponibilidad y la cadena de suministro de la materia prima se ha vuelto un problema. Esto por un lado, se debe al modelo económico establecido, el cual se basa en el consumismo y globalización, y por el otro a que los recursos naturales necesarios para mantener ese modelo son finitos y se encuentran distribuidos de manera inhomogénea en el planeta [30, 31].

Considerando a los materiales como la materia prima que mediante procesos de transformación y manufactura, sirven para satisfacer la demanda de bienes y representan una fuente de riqueza. Se ha vuelto un problema de desarrollo el tomar en cuenta o considerar la explotación sustentable de materias primas. Entendiéndose esto, como una explotación que satisfaga las necesidades al mismo tiempo que se garantiza su supervivencia y disponibilidad. Con esto solamente se enfoca a la explotación de la materia prima, y no tiene nada que ver son los procesos de transformación que siguen para convertirse en un bien que resulta, en un beneficio para el usuario y en riqueza para el que produce el bien. Este es otro tipo de problema de sustentabilidad. En efecto, el proceso de transformación de material prima en un bien o producto, es per se, una actividad cuyos efectos pueden transferirse al análisis de sustentabilidad [30, 31].

Por lo pronto, tenemos que para utilizar materiales como materia prima para producir productos y bienes, hay dos problemas implícitos de sustentabilidad: (a) explotación sustentable de los recursos y (b) procesos sustentables de transformación y manufactura. Existe un tercer problema de sustentabilidad, y que esta relacionado con los productos y bienes producidos, y como su creación, uso y desecho pueden o no ser sustentables.

En un caso extremo, de no cumplirse lo mencionado. La explotación no sustentable de recursos (materia prima) lleva a su agotamiento. El proceso de transformación de la materia prima no es sustentable, lo que lleva a un agotamiento energético-social-ambiental. El producto o bien no es sustentable dado su uso final en su ciclo de vida [30].

Haciendo esta división de tres aspectos de sustentabilidad relacionados con materia prima (recurso natural), su transformación y el tipo de producto o bien que se produce, es fácil ver la incidencia de este problema con los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU y la economía circular. De todas las características que diferencian a un material común a uno sustentable, en este estudio acotaremos estas diferencias a dos principales factores:

1. Su origen.

2. Procesos de transformación.

De modo que, un material sustentable debe tener una fuente que sea renovable y que la explotación de este no sobrepase la capacidad de restitución del material. Los cambios necesarios para que una materia prima sea un material útil para aplicaciones humanas conllevan una serie de transformaciones con costos energéticos, ambientales, económicos y sociales. Para que un material sea sustentable se deben controlar los costos que presenta el fabricarlo, de modo que se logre un balance, para que el impacto negativo que tenga sea el menor posible.

En este estudio estamos buscando fabricar materiales sustentables, a partir de fuentes de recursos que sean renovables, abundantes y aún no explotadas. Entre estas posibles fuentes nos centraremos en la utilización de especies invasoras, el lirio acuático y el sargazo, consiguiendo con esto contribuir a aliviar el problema que generan estas especies. De estos materiales fabricados propondremos tres aplicaciones, la primera es la fabricación de filtros para la separación de aceite en agua, la segunda, es la realización de materiales compuestos con una matriz polimérica, por último, conseguir un crecimiento de nanopartículas magnéticas dentro de las estructuras de las plantas.

2.2. Justificación

En la actualidad la economía del consumo nos ha llevado a una explotación de los recursos naturales en forma desmedida, lo que nos ha traído a una serie de crisis medioambien-

tales. Esto ha planteado una búsqueda de nuevas fuentes de recursos o bien, alternativas a estos que puedan cubrir las necesidades de los ya existentes. Por otro lado, se ha buscado extender la vida útil de los recursos ya extraídos, algunos de estos se reciclan o se reutilizan, con lo que se plantea que los desechos que terminan en los rellenos sanitarios o vertederos sean los menos posibles. De este modo, la introducción de las especies invasoras como una fuente viable de recursos renovables naturales representa una oportunidad para la aparición de canales donde se puedan incluir productos con ciclos de vida cortos, considerando que estos son materiales biodegradables, ya que al finalizar su ciclo de vida útil tienen un bajo impacto ambiental [32].

En paralelo con las ideas de la economía circular, pero no ajeno, en 2015 la Organización de Naciones Unidas presentó el plan de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible que presentaba los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estos 17 objetivos propuestos están divididos en rubros que permiten resolver los problemas de manera directa, éstos se observan en la figura 2.1. Con esto la ONU pretende conseguir un desarrollo igualitario para todos, donde según la región algunos objetivos toman una mayor relevancia, a modo de ejemplo en América latina son prioridad la erradicación de la pobreza y la reducción de desigualdades, esto no implica que se dejen de lado el resto de objetivos. [33]

De acuerdo con los ODS se debe buscar que los desarrollos de materiales cumplan con características específicas, las cuales describiremos grandes rasgos [30]:

- Deben ser atractivos económicamente para que proliferen en el mercado, de modo que deben ser competitivos, ya sean para aplicaciones nuevas o ya existentes.
- El impacto medio ambiental que presentan debe ser bajo o nulo, esto en busca de que, desde su extracción y hasta el final de su ciclo de vida las interacciones con el medio ambiente sean beneficiosas para este o en su defecto que no lo dañen.
- Por último, conseguir que los nuevos materiales sean socialmente aceptados, es decir que presenten las mismas facilidades o aún mejores que las de los materiales ya existentes, de forma que no comprometamos la calidad de vida de las personas por el cambio de los materiales.

Las características descritas están basadas en las tres esferas que conforman el desarrollo sostenible, ésta es la mejor forma de sentar las bases para el desarrollo de tecnología y materiales, ya que de esta forma aseguramos que los materiales novedosos sean útiles y benéficos para todos en un futuro. Consiguiendo al final del desarrollo una *innovación social*, que se puede describir como una solución nueva a un problema social la cual es más efectiva, eficiente, sustentable o solamente mejor que las soluciones existentes y para el valor que genera para la sociedad es ampliamente mayor que para los individuos, o de forma más simple, son ideas nuevas (productos, servicios y modelos) que simultáneamente trabajan sobre necesidades sociales creando nuevas relaciones o colaboraciones [34].

Debido a lo anterior dentro de nuestro estudio buscaremos integrar el uso de estos conceptos para desarrollar materiales sustentables, lo que se dividirá en dos principales partes,



Figura 2.1: Póster de objetivos de desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas [1].

la referida al *lirio acuático* y la enfocada al *sargazo*. Se debe considerar que el enfoque tomado dentro del estudio tiene una inclinación al desarrollo de materiales.

2.3. Hipótesis

Las especies invasoras vegetales tienen el potencial para ser aprovechadas como materia prima para el desarrollo de materiales sustentables, siempre que se implementen procesos de transformación basados en consideraciones de sustentabilidad.

2.4. Objetivo General

Estudiar las propiedades de residuos vegetales provenientes de sargazo y lirio acuático para proponer y validar aplicaciones mediante la fabricación de filtros de separación de aceite en agua, materiales compuestos (polímero/especie invasora) y la especie invasora funcionalizada con nanopartículas magnéticas que permitan que el material interaccione con un campo magnético aplicado.

2.4.1. Objetivos Específicos

1. Obtener muestras de sargazo y de lirio acuático que representen un problema económico o ambiental en el medio donde se han instalado.
2. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los residuos vegetales obtenidas de modo que se puedan conocer sus propiedades morfológicas y estructurales.
3. Realizar síntesis de nanopartículas magnéticas adaptando el método de coprecipitación de modo que el crecimiento se lleve a cabo dentro de la estructura del sargazo y del lirio acuático.
4. Desarrollar técnicas de manipulación de las muestras vegetales que permitan tener un control en su forma y tamaño.
5. Realizar procesos de funcionalización superficial basados en el reciclaje del poliestireno para hacer hidrofóbica la superficie de las muestras.
6. Fabricar materiales compuestos con las plantas funcionalizadas con poliestireno, en particular empleando poliéster como matriz polimérica.
7. Fabricar filtros para remover aceites de agua y realizar las pruebas de absorción.
8. Realizar la valorización de todos los procesos desarrollados para fabricar materiales funcionales analizando el costo, complejidad y potencial impacto ambiental y monetario.

2.5. Metodología

La metodología propuesta en el estudio se muestra de manera esquemática en la figura 2.2, en donde se presentan en un inicio nuestra propuesta de materia prima, el lirio acuático y el sargazo, a las cuales se les realizará una caracterización elemental, esto con el fin de conocer sus propiedades fisicoquímicas. Después, entraremos a los procesos de transformación que se realizaron, la integración de nanopartículas a las especies invasoras estudiadas, dotando a estas de nuevas propiedades, consiguiendo ampliar el uso final que pueden alcanzar. El segundo proceso llevado a cabo consta de la alteración de la forma e integración de la muestra por medios mecánicos o un moldeo, de manera que al manipular las muestras nos permita controlar la forma y tamaño final. Con la muestra con la forma deseada, se modificaron sus propiedades superficiales por medio de una funcionalización para con esto alterar la afinidad a ciertas sustancias que presentaba la muestras. Una vez controladas su forma y su afinidad, se exploraron algunas aplicaciones, y se probó su eficacia como un material de filtrado. Se fabricaron compósitos utilizando las muestras moldeadas y funcionalizadas teniendo una matriz polimérica, esto aprovechando el cambio de afinidad generado con la funcionalización.

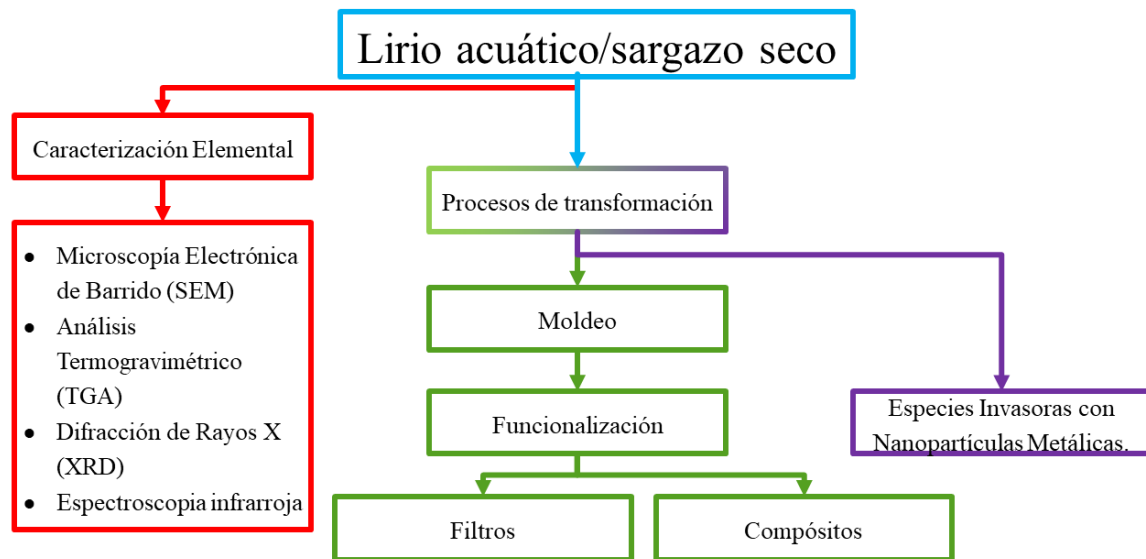


Figura 2.2: Resumen de actividades y técnicas aplicadas durante el estudio.

A manera de análisis de los procesos de transformación realizados, se presentará una recapitulación de éstos, donde se apreciarán los alcances y la valorización de los materiales resultantes.

Capítulo 3

Marco Teórico

Este capítulo se encuentra estructurado en dos principales partes, la inicial que aborda los temas pertinentes a la separación de aceite en agua, fabricación de materiales compuestos y la alteración de propiedades por la integración de nanopartículas. La segunda sección encontramos temas relacionados con las características de las especies invasoras, así como una profundización y antecedentes del sargazo y el lirio acuático.

3.1. Aplicaciones y procesos propuestos

Las temas pertinentes a las aplicaciones y procesos propuestos se encuentran organizadas de forma que las que presentan un nivel de complejidad técnica menor aparecerán antes. En un inicio se presentará lo relacionado con los filtros de separación de aceite en agua, más adelante se presentaran sobre los materiales compuestos. Finalmente, sobre el agregado de nanopartículas a materiales.

3.1.1. Separación de aceite en agua

La separación de agua y aceite presenta un reto importante que no solo es relevante para la investigación en materiales, ya que esta relaciona campos como la ecología, economía y problemas sociales. Las aguas residuales de aceites son el resultado de una gran cantidad de actividades industriales como la del acero, del aluminio, los alimentos, textil y petroquímica. Por lo que se han convertido en el contaminante mas común en todo el mundo [35, 36]. Por otro lado los frecuentes derrames de aceite accidentales son de gran preocupación, la descarga puede conducir a una grave contaminación ambiental, además de presentar una gran pérdida de energía [35].

Existen una gran variedad de métodos que permiten la separación de agua y aceite, en

este estudio nos centraremos en la utilización de filtros. Una de las principales propiedades que se ha estudiado es la afinidad superficial con el aceite/agua. Esta afinidad superficial es una propiedad intrínseca de la superficie de los sólidos que determina el fenómeno de interacción superficial cuando una sustancia entra en contacto con la superficie. Si un material presenta diferentes propiedades de afinidad superficial para el agua y el aceite, tales como hidrofobicidad (tendencia a repeler el agua) y oleofilidad (tendencia a unirse al aceite) o bien, hidrofilidad (tendencia a unirse al agua) y oleofobicidad (tendencia a repeler el aceite), éste puede ayudar a realizar en la separación selectiva de las mezclas de aceite y agua [35]. Materiales con hidrofobicidad y oleofilidad pueden ser utilizado como filtros o absorbentes de aceite a partir de las mezclas de aceite y agua.

Comúnmente se toman dos aproximaciones para fabricar materiales para filtración:

1. Modificación química de los poros de sustratos con materiales con propiedades de afinidad superficial especiales.
2. Construcción de estructuras porosas con materiales con afinidad superficial especial.

Dentro de nuestro estudio nos centramos en la primera de estas aproximaciones, donde la modificación superficial del sustrato permite modificar la afinidad superficial, de manera que esta se volverá hidrofóbica y oleofílica, esto por medio de un recubrimiento polimérico.

3.1.2. Materiales compuestos

Una de las áreas de oportunidad a explorar dentro del estudio, es la fabricación de materiales compuestos a base de la integración de los materiales derivados del lirio acuático y del sargazo con una matriz polimérica, sin embargo por su naturaleza estos presentan una afinidad hidrofílica predominante. De manera que en principio la unión estable con materiales hidrofóbicos, como lo son los polímeros, puede llegar a presentar algunos retos.

Los materiales compuestos son aquellos en donde se pueden observar dos componentes insolubles entre sí, existe un sin número de materiales compuestos debido a la gran cantidad de combinaciones posibles, sin embargo estos deben poseer características iguales o mejores que los constituyentes de estos de forma aislada, o bien, tener importancia en algún otros aspecto [37].

El uso de compósitos con componentes de origen natural se ha extendido a una gran cantidad de áreas de estudio, el grupo de Dweib en 2006 presentó una propuesta donde formaban paneles de techo, fabricados a partir de resina basada aceite de soya y fibras de celulosa obtenidas de hojas de papel procedentes del reciclaje de hojas de cartón. Las hojas fueron previamente probadas para asegurar que tuvieran la resistencia y dureza necesarias para ser utilizadas en la construcción de techos [38].

Una de las mayores industrias en el mundo, ha explorado desde hace décadas el uso de biocompósitos es la automotriz, en la cual hoy en día se utilizan en una alta cantidad de componentes. Algunos componentes internos como los tableros y paneles internos de las puertas utilizan fibras naturales y polipropileno producidos por *Jhonson Controls, Inc.* para *Daimler Chrysler*. En el año 2000 *Audi* lanzó el modelo *A2*, un auto de rango medio, cuya puerta poseía paneles de ajuste que fueron fabricados con poliuretano reforzado con una mezcla de linaza y sisal tejida [38].

Los bicompuestos presentan una gran oportunidad como un material alternativo que pueda cumplir el importante rol que cumple la madera en el mercado de las piezas mobiliarias. Sin embargo, las biofibras se han utilizado en la construcción desde hace mucho tiempo, se conoce que por siglos mezclas de paja y arcilla secadas al sol fueron empleadas como compósitos para construcción en Egipto, así con el paso de los años los materiales cambiaron usando tuberías, perfiles pultruidos y paneles con matrices de poliéster como bases de la construcción actual [39].

Como se mencionó, en una gran cantidad de aplicaciones se fabrican materiales compuestos utilizando una matriz polimérica, centrándonos a nuestro estudio se utilizaron el poliéster y el poliestireno, por lo que se dedica una sección para incluir generalidades sobre estos materiales.

Polímeros

Los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidos por unidades que se repiten a lo largo de dicha moléculas, a estas unidades se les conoce como monómeros; se encuentran unidos por enlaces covalentes, estos se producen mediante un proceso conocido como polimerización, en este proceso se produce la reacción de miles de monómeros que pasan a formar parte de una larga cadena molecular [40].

El primer plástico sintético fue creado por el químico Leo Barkeland, fabricando en 1909 un plástico termofijo, nombrado bakelita debido a su inventor. El cual es una resina de formaldehído, lo que permitía su utilización en moldes, dotándolo de una gran versatilidad para diferentes aplicaciones, como carcasas de teléfonos y de radios, artículos de escritorio, ceniceros, etc. Debido al gran desarrollo industrial que se dio en las décadas posteriores se creó una mayor variedad de plásticos que se adecuarían, a una cada vez más amplia gama de aplicaciones. Llegados a la década de 1930 se consigue el desarrollo industrial que permitió la fabricación de los polímeros más importantes de la actualidad, como el poli(cloruro de vinilo), el poliestireno, las poliolefinas y el poli(metacrilato de metilo). Además, durante este periodo, surgirán lo que en un futuro supondrá un refuerzo muy utilizado en conjunción sinérgica con las resinas de poliéster, conformando así los plásticos reforzados, formando las primeras partidas de fibras de vidrio de pequeño diámetro, aptas para ser tejidas [40].

Poliéster

Dentro de este estudio se concentro en la utilización de polímeros a base de resinas de poliésteres comerciales, esto por su bajo costo y la facilidad que presenta el trabajar con estos. El poliéster es un material polimérico que contiene grupos éster como uno de sus mayores componentes estructurales de las principales cadenas de las macromoléculas de las que esta compuesto dicho material polimérico. De estos existen una gran variedad en la naturaleza pero regularmente el término se emplea para referirse a los fabricados artificialmente, de entre estos se pueden destacar el polimetil(tereftalato) (PET), el cual es ocupado desde la fabricación de fibras textiles hasta su utilización como recipiente en diferentes tipos de alimentos. Los poliésteres presentan esta gran versatilidad debido a sus propiedades [41].

Poliestireno

Uno de los componentes vinilos mayormente usados dentro de los poliésteres es el estireno, principalmente por la facilidad que presenta su polimerización, sumado a su bajo costo y sus propiedades fisicoquímicas ha llevado a una alta explotación de este poliéster [42]. Según lo reportado en la literatura el poliestireno esta compuesto por unidades monoméricas como se muestra en la figura 3.1, este está estructurado en un arreglo predominantemente cabeza-tallo, los grupos fenilo se encuentran ligados a átomos de carbón de forma alternada. La orientación de los grupos fenilo es de manera aleatoria, lo que lleva a un estructura principalmente amorfa [43].

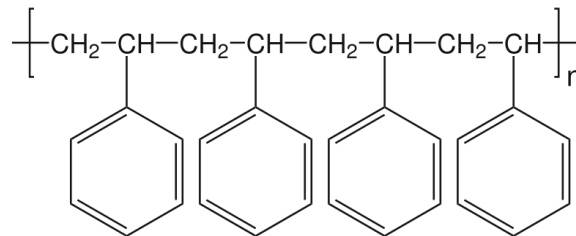
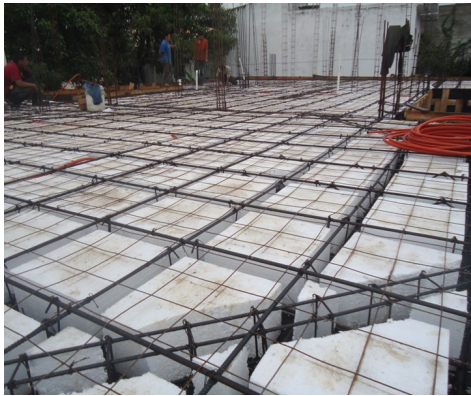


Figura 3.1: Diagrama cadena de poliestireno.

Este polímero es ampliamente usado, se puede encontrar en la industria de la construcción utilizado como aislantes térmicos, en la de los alimentos como envases, o bien como recipientes desechables, además de usarlo como protección en algunos tipos de embalaje, fotografías de estas aplicaciones se aprecian en la figura 3.2.

Al ser tan utilizado se vuelve una fuente potencial de basura, por lo que se han buscado alternativas que permitan reciclar la gran cantidad de residuos que genera este polímero. Por ejemplo, existen estudios que buscan aplicaciones de éste, entre los que abordan temas relevantes con nuestro estudio se encuentran los realizados por los grupos de Pimentel y Simonsen. Los cuales utilizaron fibras naturales y las mezclaron con el poliestireno reciclado para la fabricación de materiales compuestos [44, 45]. Además existen métodos industriales aplicados en compañías formales para realizar el reciclaje a gran escala, empresas como GreenMax son un ejemplo de estas [46]. Uno de los grandes problemas que presenta el reciclado de los materiales es la demanda de estos, la cual es fácilmente cubierta por la cantidad



(a) Construcción



(b) Alimentos



(c) Embalaje

Figura 3.2: Ejemplos de aplicaciones del poliestireno.

de materia reciclable generada, de modo que para ampliar la cantidad de masa reciclada antes debemos generar alternativas que permitan ingresar a los materiales reciclados en nuevas aplicaciones. El poliestireno es relevante en nuestro estudio ya que lo usamos como medio para alterar la afinidad superficial de modo que nos permita tanto, fabricar los filtros de separación de agua y aceite, así como promover una unión estable con la matriz polimérica utilizada para la fabricación de materiales compuestos [35].

3.1.3. Alteración de propiedades de materiales con nanoestructuras

Las fabricación de nuevos materiales busca mejorar los materiales utilizados en la actualidad, esto se puede realizar con la introducción de un nuevo material que reemplace al primero debido a que las propiedades de este son mejores, o bien modificando el ya utilizado. Entre las formas de modificación de estos materiales resaltaremos la aplicación de nanotecnología [47].

La nanotecnología es ciencia e ingeniería conducida en la escala nanométrica, considerada desde 1 a 100nm. Los tamaños extremadamente pequeños que maneja esta ciencia hacen que las propiedades de los materiales cambien, esto debido a la relación superficie-volumen, provocando que la mayor parte de los átomos de la nanoestructura se encuentren en la superficie, lo que significa que es más probable que reaccionen con partículas de las sustancias vecinas. Así, la investigación del comportamiento de la materia a escala nanométrica abre una prometedora perspectiva de nuevos conocimientos y de aplicaciones en todos los campos científicos y/o tecnológicos. Vistas como materiales, las nanopartículas son tan pequeñas que exhiben características no observables en estructuras más grandes (incluso después de alcanzar tamaños de 100nm). Vistas como moléculas, son tan grandes que proporcionan acceso al reino del comportamiento cuántico, que no sería accesible de otra manera [37].

La integración de nanoestructuras permitirá proveer a los materiales de nuevas propiedades, con lo que se logrará llevarlos a aplicaciones a las cuales sería imposible hacerlo. Un ejemplo es el mostrado por el grupo de investigación de Lou, en donde con la inclusión de nanopartículas magnéticas modificaban las propiedades de la madera de manera que ésta sea empleada como blindaje electromagnético [47].

Por otro lado el grupo de Pinto realizó un crecimiento de nanopartículas de oro en usando como sustrato fibras de celulosa, consiguiendo con esto un material nano-compuesto, el cual por la inclusión de las nanopartículas de oro permitiría ser utilizado en productos de papeles de seguridad [48].

Con la introducción de nanoestructuras a materiales conocidos podemos ampliar las propiedades de los materiales iniciales, que pueden llegar a modificar su comportamiento. Por lo que al proponer este como un proceso de valor agregado dentro del estudio, permite sentar las bases para ampliar las aplicaciones finales que pueden alcanzar el lirio acuático y el sargazo.

3.2. Especies vegetales invasoras

El desarrollo humano de alguna manera siempre ha estado relacionado con la utilización de recursos provenientes de origen vegetal, donde las aplicaciones varían desde su uso como alimento, vestimenta, combustible, vivienda, etc. Esta versatilidad que presentan este tipo de materiales nos permite en la actualidad utilizarlos en una variedad de aplicaciones novedosas, en donde es necesario el estudio de sus propiedades, de modo que basado en éstas los materiales sean aprovechados en forma eficiente [49, 50].

Las especies invasoras o alienígenas, son aquellas especies que se trasladan de una región geográfica a otra en la cual, se establecen, proliferan y persisten. Las invasiones biológicas han causado más extinciones de especies que las causadas por el cambio climático inducido por las actividades humanas, y son la segunda culpable de la pérdida de hábitats naturales. Las invasiones biológicas son uno de los principales factores del agotamiento de la biodiversidad, las plantas invasivas en particular son las culpables de la desaparición de especies nativas y degradación de ecosistemas. Estos últimos, se ven severamente afectados debido a que las plantas vegetales son capaces de provocar una alteración en el ciclo de nutrientes, en el régimen de incendios, la hidrología, fuentes de energías, en la abundancia de especies nativas y en su supervivencia [51, 52].

Se estima que cerca de las 20,000 especies de plantas silvestres en Estados Unidos, 4,500 tienen tendencias invasivas y miles residen en los jardines urbanos, incrementándose en la mancha urbana, con consecuencias desconocidas en las áreas perimetrales a éstas. Además de considerar los factores ecológicos que presenta la inclusión de especies ajenas a un medio ambiente, se han realizado estudios del impacto económico que representan, se ha encontrado que el costo anual en E.U., debido a las especies invasoras (incluyendo hierbas, invertebrados, vertebrados y patógenos) se encuentra en un rango alrededor de los 120 billones de dólares [52].

Una de las grandes interrogantes que plantea la existencia de las especies invasoras es: ¿por qué éstas especies tienen tanto éxito cuando compiten con las especies nativas?, para responder a esta pregunta se han propuesto hipótesis para explicar el fenómeno. La hipótesis de *diversidad-invasividad* propuesta por Elton en 1958, donde menciona que "*Generalmente, las comunidades ricas en especies son capaces de utilizar todos los recursos disponibles, dificultando el ingreso de especies invasivas a estas comunidades, comparado con el de otras con comunidades menos diversas.*" de modo que si una comunidad no utiliza todos los recursos de los que dispone crea un *nicho vacío* el cual es susceptible a una invasión. De igual forma la hipótesis de *La fluctuación de recursos* se basa en el estado de la disponibilidad de recursos en un área dada, en este caso la disponibilidad de recursos en exceso se da por dos principales motivos:

1. El primero se da cuando las plantas nativas disminuyen su consumo debido a una disminución de la población seguida de un disturbio en el brote de depredadores.
2. El segundo ocurre cuando una cantidad mayor de nutrientes están disponibles de fuen-

tes internas o externas, como un incremento en las precipitaciones o una mineralización.

La hipótesis de los *Enemigos Naturales*, en la cual se asume que los enemigos naturales que mantienen en control la población de las plantas en su hábitat nativo, de modo que una vez que esta especie vegetal es extraída de su medio, esta crece sin limitación alguna en el nuevo hábitat. Estos enemigos, no se limita solamente a herbívoros, entre estos pueden encontrarse patógenos fúngicos, y microorganismos destructivos de suelo y agua [52].

Las plantas, en presencia de herbívoros especialistas y patógenos, desarrollan defensas y tolerancias a estos enemigos, con la intención de sobrevivir y proliferar en sus tierras nativas. Estas relaciones formadas con enemigos especialistas provocan una coevolución, con el paso del tiempo, las especies de plantas han evolucionado para designar sus fuentes de recursos hacia la supervivencia en la presencia de enemigos. La hipótesis de la *Evolución de Mayor Capacidad Competitiva (EMCC)* toma la hipótesis de *Enemigos Naturales* y da un paso hacia adelante, establece que sólo cuando las plantas escapan de sus coevolucionados enemigos especializados, son capaces de ganar ventaja sobre las otras plantas de la comunidad a las que fueron introducidas, de modo que estas plantas introducidas toman los recursos que previamente usaban para defensa y los utilizan en su crecimiento y reproducción [51, 52].

3.2.1. Estudio específico: sargazo y lirio acuático.

Actualmente, dos especies invasoras son de gran importancia y a pesar de ser problemas bien localizados, son de interés nacional. Se trata del sargazo y del lirio acuático. El sargazo por una parte, ha sido un problema que se ha agudizado en los últimos años, afectando de manera importante la zona del caribe mexicano. El lirio acuático históricamente reconocido como un problema en diferentes regiones del país, ha sido actualmente un problema importante a nivel estatal. Esta situación actual para estas especies invasoras han sido la principal motivación del presente estudio.

3.2.2. Sargazo

El caso de sargazo generó gran controversia en los meses de junio y julio del 2019, debido a las grandes cantidades de sargazo que fueron depositadas en las playas del caribe Mexicano en las arribazones que sucedieron durante estos meses. Estas grandes cantidades produjeron una baja en la cantidad de ocupación hotelera con respecto a otros años, siendo esta un 10% menor que años anteriores [53]. Esto tuvo un impacto significativo en las ganancias turísticas durante estas fechas, las cuales, suelen ser de los meses mayormente provechosos para el dicho sector. Al igual que el año anterior, se han comenzado a observar arribazones, siendo que a principios del mes de junio, se recibieron en las costas de Quintana Roo un aproximado de 500 toneladas de sargazo [54]. Por lo que este es un problema latente que tiene el potencial de afectar una vez más a los habitantes de la región. Ya que no solo limita

el ingreso a las playas a los asistentes en busca de turismo, si no que también impide a la gente que se dedica a la pesca debido a que limita la navegación libre por las costas.

De los motivos que destacan y convierten al sargazo en un problema es el potencial daño a la salud que puede provocar, a pesar de que la macroalga es inofensiva para los seres humanos y hasta en condiciones concretas puede ser ingerida, presenta un riesgo una vez llega a las costas. Debido a que su descomposición suele tener como resultado la liberación de ácido sulfúrico, el cual puede provocar daños en la piel [55]. Esta descomposición genera a su vez, malos olores que detienen a la población interesada en realizar el turismo en la región. Sin embargo, a pesar de que este fenómeno generó una gran problemática, debemos entender que esto sucede por causas naturales.

Morfología y biología del sargazo

Si bien el reino al que pertenece el sargazo no es el plantae y por lo tanto no es una especie vegetal, dentro del estudio por simplicidad se le llamará así por su cercanía con este reino, ya que al igual que los organismos vegetales, presenta una estructura básica compuesta de un tallo fijado firmemente a uno a varios ejes principales divididos en ramas de varios órdenes que pueden diferenciarse en apéndices foliares llamados hojas, vesículas (aeroquistes) y receptáculos (órganos reproductivos). Además el sargazo presenta actividad fotosintética, sin embargo su diferenciación con el reino plantae se debe principalmente a el tipo de clorofila que utiliza para sus actividades metabólicas es distinto al de las especies vegetales [56].

El sargazo, es una familia de especies de macroalgas, que se encuentran principalmente en el océano atlántico en una zona que es llamada “El Mar del Sargazo”, la cual está delimitada por las corrientes marinas que corren a lo largo de los continentes, en la Figura 3.3 se puede apreciar una representación de la zona donde se encuentran el sargazo en su hábitat natural [56].

En esta zona las “islas de sargazo” se vuelven como oasis para esta región oceánica, la cual es considerada un desierto marino, lo que dificulta encontrar fuentes de alimento, de manera que la existencia de las macroalgas de sargazo permite la proliferación de algunas especies, así como zonas. Estas algas marinas llegan a las costas debido a los cambios en las corrientes marinas que se dan en los cambios estacionales, sucediendo que los arribazones se presenten en mayor medida durante los meses de junio-julio y noviembre-diciembre [57].



Figura 3.3: Mapa señalado con la región del mar de los sargazos.

Ejemplos de aplicaciones del sargazo

Para el caso de sargazo, podemos encontrar algunos ejemplos de aplicación los cuales se resumen en la figura 3.4. El grupo de investigación de Chen, presentó un retardante de incendios a base de fomi de poliuretano recubierto mediante un aerogel a base de una arcilla de alginatos, los cuales son bases estructurales de las macroalgas, y en el caso del sargazo y del resto de algas marrones y doradas, contienen una gran cantidad de estos materiales, los cuales en los últimos años se han estudiado en busca de sustitutos ya que permiten fabricar bioplásticos [3, 58, 59, 60, 61, 62, 63].

Por su parte el grupo de Anggadiredja, realizó estudios con sargazo recolectado en las costas de las islas Seribu en Indonesia, del que obtuvieron extractos, con lo que estudiaron su habilidad antioxidante, demostrando así que algunos de los componentes del sargazo pueden ser utilizados como la base de algunos fármacos [2].

La biosorción de metales pesados por medio de las algas de sargazo es posible, el grupo de Yang lo demostró al recolectar cromo hexavalente con plantas de sargazo tratadas químicamente con formaldehído, cloruro de calcio, entre otros químicos. Con esto lograron recolectar hasta $1.123 \text{ mmol g}^{-1}$ [7]. La absorción de metales pesados puede realizarse con otro tipo de materiales, entre los mas comunes están los fabricados a base de carbón activado, en este caso Esnaeili y su grupo fabricaron carbón activado a partir de plantas de sargazo por medio de una descomposición ácida. Durante su estudio comprobaron la efectividad de este al recolectar Cobre(II) de una solución de aguas residuales. Logrando la recolección completa en 2h [4].

La última de las aplicaciones que describiremos será la realizada por el grupo de Ku-



Figura 3.4: Aplicaciones conocidas del sargazo durante su ciclo de vida [2, 3, 4, 5, 6, 7].

mari, en esta se realizaba un enriquecimiento del suelo por medio de un acondicionador y fertilizante a base del sargazo, ésto para alimentar cultivos de jitomate (*Lycopersicon esculentum*), donde concluyeron que la inclusión del sargazo en los cultivos aportaba algunos componentes que promovían el crecimiento de los cultivos [5].

3.2.3. Lirio Acuático

El lirio acuático se presenta en gran cantidad de lagos, ríos y presas en México, esto es un problema debido a su alta tasa de proliferación que permite duplicar su tamaño en al menos 5 días [64]. Lo anterior provoca la generación de una gran cantidad de lirio acuático, que lleva a una disminución en el ingreso de luz solar lo que, a su vez, disminuye el crecimiento de las especies acuáticas locales, debido a una importante disminución en las microalgas que son las principales productoras de oxígeno. Por otro lado, su crecimiento desmedido ha traído consigo consecuencias económicas importantes, como en la navegación en ríos y lagos, la pesca, y la irrigación en la agricultura se han afectado considerablemente en áreas invadidas por la maleza. No menos dañino, es el efecto que ocasiona la maleza cuando ésta llega a los generadores de las estaciones hidroeléctricas, lo que provoca cortes eléctricos, hasta que estos puedan ser limpiados de los tejidos de las plantas [65].

En el caso de México se han registrado la existencia de lirio acuático en los siguientes estados: Aguascalientes, Campeche, Chiapas, Colima, Distrito Federal, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz [66]. La biomasa en peso húmedo,

presente en cuerpos de agua mexicanos generalmente se encuentra entre 11 y 51 kg/m² , correspondientes a 0.62 y 2.87 kg/m² en peso seco. Se ha determinado la tasa relativa de crecimiento en más de diez cuerpos de agua distribuidos en todo el país y en las zonas más conflictivas, obteniéndose valores máximos de 9.3 y mínimos de 1.5 % por día. Se cuantificó que el crecimiento puede ser entre cuatro y cinco veces mayor en primavera y verano. Los estudios realizados establecen que muchos clones pueden producir cientos de semillas viables y que la falta de reconocimiento de este hecho ha complicado los esfuerzos de control de esta maleza [64, 65, 67].

Morfología y biología del lirio acuático

El lirio acuático es una especie originaria de la zona de la cuenca del Amazonas en Brasil, el cual fue extraído, por fines estéticos, para ser introducido en jardines en todo el mundo. Esta puede proliferar en mantos acuíferos con pH entre 6.2 y 7, de manera que gran cantidad de los mantos acuíferos de agua dulce que existen en Latinoamérica presentan condiciones ideales de crecimiento para los lirios acuáticos [67].

El lirio acuático es una planta monocotiledónea perenne, que se reproduce por medio de semillas y estolones, los cuales llevan consigo yemas axilares de donde pueden surgir nuevos retoños. Su cuerpo se compone de una raíz que permanece sumergida en el agua, hojas envainadas que surgen de un tallo corto con estructura principalmente hueca, lo que le permite mantenerse en la superficie del agua [64, 65, 67].

Ejemplos de aplicaciones del lirio acuático

El lirio acuático históricamente ha presentado un grave problema, por lo que una gran cantidad de esfuerzos se han realizado para aprovecharlo en algunas aplicaciones, éstas se presentan de manera resumida en la figura 3.5.

La fabricación de nanocelulosa se ha vuelto una de las actividades a la que varios grupos de investigación se dedican, uno de estos son el del grupo de Marimuthu, el cual, a partir del lirio acuático producen nanofibras de celulosa, al inicio crio-fracturaron con nitrógeno líquido para después ingresar los fragmentos a una sonicación para la individualización de las fibras. [8]

Por otro lado, se ha buscado aprovechar la planta de lirio acuático como una posible forma de fitorremediación. El grupo de Liao, estudiaron la capacidad de absorción del lirio acuático de metales pesados, permitiendo recuperar zonas baldías contaminadas, donde el estudio se enfocaba principalmente en metales como Cobre, Plomo, Cadmio, Níquel y Zinc [9, 10]. Vertiente que se ha explorado en los últimos años es la generación de carbón activado, como lo ha hecho el grupo de El-Wakil, en donde fabricaban el carbón activado para remover el plomo que se encontraba en una solución acuosa, este lo obtenían a partir del lirio acuático seco, tras una activación química con ácido fosfórico y un horneado final [11].



Figura 3.5: Aplicaciones conocidas del lirio acuático durante su ciclo de vida [8, 9, 10, 11, 12].

Entre las últimas aplicaciones revisadas para el lirio acuático fue la presentada por Nath y colaboradores donde lo mezclaban con estiércol de búfalo para conseguir un biofertilizante, analizaron el valor nutricional de esto y su viabilidad para ser aprovechado en cultivos locales [12].

Capítulo 4

Materiales y métodos

En el presente estudio se realizó una caracterización elemental del sargazo y lirio acuático, siendo éste el primer estudio realizado con estas especies dentro del grupo de trabajo. Como parte de estos estudios se utilizaron la microscopía electrónica de barrido para observar la morfología superficial. El análisis termogravimétrico que permite cuantificar la composición en masa de los compuestos presentes. La difracción de rayos X la cual nos arroja información estructural de la muestra y por último espectroscopía infrarroja con la cual se obtiene información sobre la composición química de las especies estudiadas.

Una vez obtenida la información por medio de la caracterización se procedió a fabricar materiales empleando estas plantas. En un caso, se realizó la síntesis de nanopartículas de magnetita soportadas en la estructura de las plantas. Estas partículas se eligieron debido a que son fáciles de producir y el método se podía adaptar fácilmente para realizarse en presencia de las plantas. Por otro lado, se realizó el trabajo del moldeo, el cual permite la conformación de las muestras en diferentes geometrías y tamaños. Una vez que se estableció como moldear muestras con cualquiera de las plantas, se realizó un proceso de funcionalización superficial empleando un barniz líquido de poliestireno reciclado. Como resultado de la funcionalización, la superficie del material es hidrófoba y esta propiedad ha sido aprovechada. Por una parte se han fabricado compósitos de las plantas funcionalizadas dispersas en una matriz de poliéster. En este caso, la hidrofobicidad de las plantas sirve para mejorar la compatibilidad entre las superficies de la planta y el polímero, resultado en una mejor adherencia entre ellas. Por otra parte, se ha aprovechado la hidrofobicidad de las plantas para fabricar filtros aptos para separar aceites en agua.

4.1. Caracterización elemental

Una parte importante para conocer y entender algunas características y propiedades básicas de las plantas, se relaciona con sus propiedades morfológicas y estructurales. Al estudio de estas propiedades se le conoce como caracterización elemental. En el presente trabajo

se han utilizado la microscopía electrónica de barrido, la difracción de Rayos X, el análisis termogravimétrico y la espectroscopía infrarroja. A continuación se describen estas técnicas de caracterización.

4.1.1. Microscopía electrónica de barrido

La microscopía se ha utilizado para observar la morfología superficial de las plantas. Con el avance de la tecnología las técnicas de microscopía han evolucionado hasta desarrollar métodos de alta resolución como la microscopía electrónica de barrido ("SEM" por sus siglas en inglés), esta ha permitido observar detalles con mayor resolución.

En un microscopio de barrido, un haz de electrones con una energía entre 1 y 50 keV viaja en un vacío de aproximadamente 10^{-7} bars, hasta que este se hace incidir sobre una muestra opaca a los electrones, por medio de las lentes electromagnéticas el haz se focaliza sobre la superficie de la muestra, de forma que realiza un barrido de la misma, la interacción del haz sobre la muestra genera señales asociadas a diferentes propiedades del material.

La fuente habitual de electrones es un filamento de wolframio que se calienta al paso de la corriente, los electrones son emitidos por la acción de un campo eléctrico creado por la diferencia de potencial que se crea entre el filamento, que actúa como cátodo y un ánodo. Existe un tercer electrodo con potencial negativo respecto al cátodo y que actúa como rejilla, llamado electrodo o cilindro de Wehnelt. Al conjunto de estos componentes se le conoce como cañón de electrones [37].

El haz producido en el cañón de electrones, a los voltajes empleados, no pueden propagarse en el aire, puesto que se extinguiría por la interacción de los electrones con las moléculas dispersas en el aire, por lo que se necesita tener el sistema en vacío. Para producir un haz fino de electrones enfocado sobre la muestra, se emplean lentes magnéticas. Estas lentes permiten corregir la trayectoria del haz de los electrones con el campo magnético producido en un carrete cilíndrico. Este carrete está diseñado para imponer un movimiento helicoidal a los electrones que ingresan con diferentes ángulos al campo generado por la lente. La intensidad de este campo magnético se puede ajustar de modo que los electrones que ingresan lleguen a la vez al mismo punto, manera que permite enfocar el haz. El sistema de lentes condensadoras es el responsable de hacer que el haz de electrones llegue a la muestra y determina el tamaño del haz que incide sobre la superficie de la muestra. El barrido se realiza mediante las bobinas localizadas en la lente objetivo. Una bobina desvía el haz en la dirección x mientras otra lo hace en la dirección y , de modo que se pueda irradiar toda la superficie de la muestra haciendo un barrido con el haz de electrones.

Una vez que el haz incide sobre la muestra, se pueden observar una serie de señales, las más usadas de estas son los electrones secundarios y los retrodispersados. La señal de electrones secundarios se genera en una delgada capa superficial del orden de 50 a 100 Å. Al ser grande el número de electrones emitido se puede establecer un buen contraste, además de que, al ser electrones de baja energía, pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria.

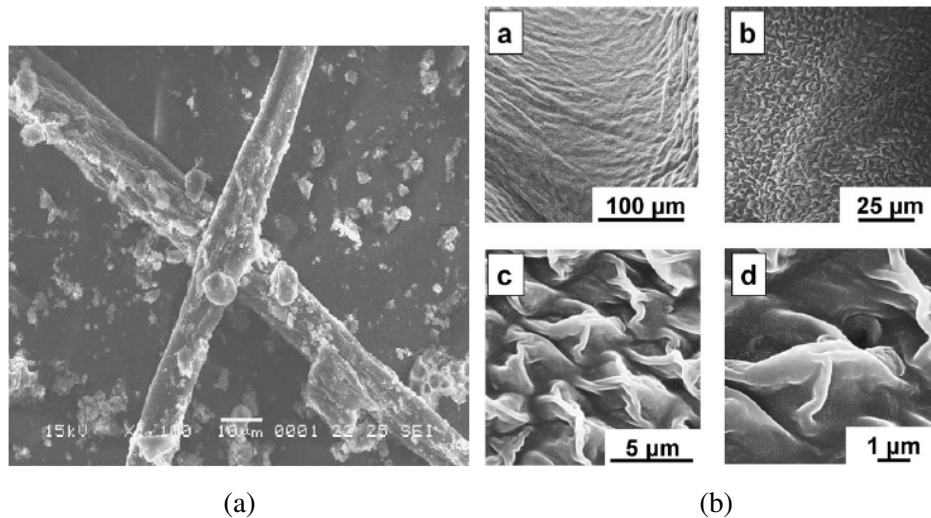


Figura 4.1: Ejemplos de imágenes de plantas tomadas por SEM; a) Imagen SEM de fibras de lirio acuático lavadas [8], b) Imágenes SEM recubiertas con osmio de macroalgas marinas secas tras una limpieza en NaCl al 3.5 % por 10 min y mantenido a un desecador al vacío por 24 h. [13].

Esto hace que un haz de electrones secundarios sea ideal para realizar un estudio topográfico de la muestra. Los electrones retrodispersados presentan energías mayores a 50 eV, estos emergen de zonas más profundas en comparación con los secundarios. Ya que tienen mayor energía aportan información sobre la composición de la muestra, siendo más energéticos los provenientes de materiales con peso atómico mayor. De modo que las imágenes generadas por estos electrones presentan contrastes determinados por la diferencia de peso molecular de los elementos que constituyen la muestra observada. En la figura 4.1 se observan ejemplos de imágenes por parte del grupo Thriripura y del grupo de Takahashi, en donde se observan fibras del lirio acuático e imágenes de macroalgas marinas, donde las utilizaban para conocer la topografía de las plantas [13].

Entre los resultados de la interacción del haz de electrones se puede observar la emisión de rayos X, los rayos X emitidos son característicos de la muestra bombardeada por el haz y contienen información sobre su composición química. Esta radiación se usa como parte de la técnica conocida como espectroscopia de energía de rayos X dispersada (EDS, por sus siglas en ingles). Es común encontrar módulos complementarios para realizar esta técnica en equipos de microscopía electrónica de barrido [37].

Para este estudio se utilizó un microscopio electrónico de barrido modelo Quanta 250 de la marca FEI, el cual permite operaciones de trabajo en *modo ambiental* en donde se trabajan las muestras en presiones del orden de 609 mPa. Estas bajas presiones permiten ingresar muestras incluso húmedas, de modo que es ideal para observar muestras biológicas. El lirio acuático y el sargazo fueron observadas bajo estas condiciones lo que permitió apreciar las superficies de las muestras con mayor detalle así como sucedió el crecimiento de partículas metálicas.

4.1.2. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico o TGA por sus siglas en ingles, es una técnica que mide los cambios en la masa de la muestra mientras esta es sometida a una variación controlada de temperatura. Esta variación puede ser isotérmica o no isotérmica, el análisis mas común es del tipo no isotérmico en el cual la temperatura cambia de forma lineal con una razón de cambio constante. El dispositivo de medición es llamado termobalanza, la cual es una combinación de una balanza analítica con un horno con programación electrónica. Un rango típico de temperatura de trabajo va desde la temperatura ambiente hasta los 1000-1600 °C. Los incrementos comúnmente usados están en el rango de 1-20°C / min. Las mediciones son realizadas en atmosferas gaseosas controladas que pueden ser estáticas o dinámicas. Las atmosferas dinámicas se llevan a cabo con gas corriendo dentro de la cámara con flujo constante (50-100 mL / min). El gas puede ser inerte (Nitrógeno, Argón o Helio) o reactivo (Oxígeno, Hidrogeno, Dióxido de Carbón, etc.) [68].

Las muestras estudiadas por TGA son sólidas aunque también se pueden usar líquidos con bajo índice de volatilidad. La masa de muestra analizada esta normalmente en el rango de 1-100 mg, aunque la mayoría de los instrumentos modernos permiten medir masas del orden de gramos. La sensibilidad del equipo de TGA esta limitada por la sensibilidad de la balanza, la cual puede ser tan alta como 0.1 μg . Al someter un material a un proceso de calentamiento o enfriamiento, estos pueden ganar o perder masa. Ejemplos de pérdida de masa incluyen degradación o descomposición, vaporización de los líquidos internos y/o superficiales de los sólidos, sublimación, reducción de óxidos metálicos a metales o desorción de gases. Una ganancia de masa puede ser observada en la absorción de gases, como en la reacción de solidos con gases reactivos como oxígeno, cloro y monóxido de carbono.

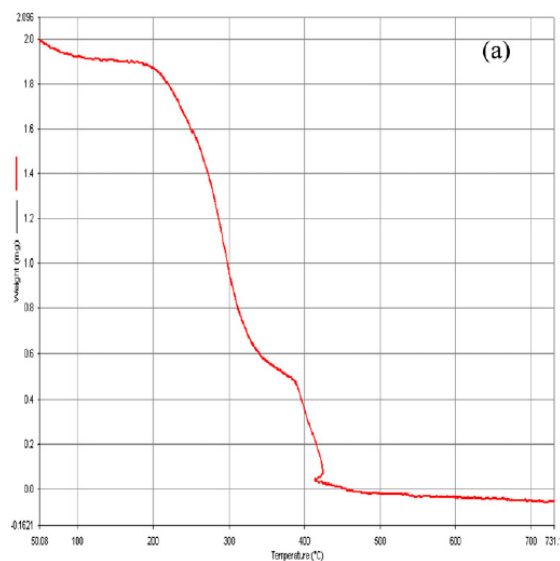


Figura 4.2: Ejemplos de curva TG del lirio acuático [8].

Los resultados de las mediciones de TGA son curvas termogravimétricas que muestran la masa en función de la temperatura y seguido se presenta también la derivada de la curva (dm/dT) con el fin de ayudar a identificar las temperaturas donde inician o terminan procesos de variación de masa. La curva termogravimétrica (TG), muestra la masa absoluta (en gramos o en su forma relativa en porcentaje de masa inicial). En las curvas derivadas los picos y valles representan ganancias o pérdidas de masa respectivamente [68]. Un ejemplo de estas curvas se aprecian en la figura 4.2, la cual pertenece a el grupo de Thiripura, los cuales se realizaron a una planta lirio acuático [8].

En el presente trabajo, las mediciones de TGA se realizaron en un equipo Perkin Elmer TGA 4000. Para todas las muestras analizadas se utilizará una masa menor a los 10 mg de lirio acuático o bien de del sargazo. La rampa de aumento de temperatura se realizó con una tasa de 20 °C / min en el rango de 50-750 °C. Este rango se utilizó debido a que los componentes de las muestras vegetales se volatilizan en este rango de temperatura. Para todas las mediciones se trabajo con una atmosfera de Nitrógeno molecular con un flujo de 20 mL / min.

4.1.3. Difracción de rayos X

Los rayos X son radiación electromagnética que se sitúa entre a las regiones de la radiación ultravioleta y de los rayos gamma que emiten las substancias radioactivas. La unidad media en la región de los rayos X es el angstrom (Å), equivalente a 10^{-10} m. Los rayos X usados para estudios de difracción típicamente tienen valores de longitud de onda en el rango de 0.5-2.5 Å, mientras que la longitud de onda de la luz visible está en el orden de 6000 Å. Esto toma gran importancia ya que las distancias interatómicas de enlace que presentan los materiales solidos varía entre 1 y 4 Å [37].

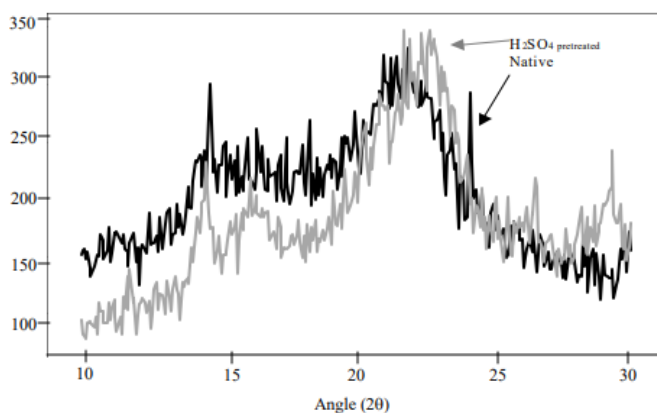


Figura 4.3: Ejemplo de patrón de difracción de rayos X del lirio acuático nativo y preparado con H₂SO₄ [14].

La estructura cristalina está relacionada con las propiedades físicas que muestran los sólidos cristalinos. Por tal razón, la cristalografía aplicada utiliza los rayos X como una herramienta básica en el estudio y caracterización de nuevos materiales. Dado que las longitudes de onda de los rayos X son del mismo orden de magnitud que la distancia entre planos cristalinos, éstos son difractados cuando interactúan con el material. La señal difractada, el difractograma, es característico de la estructura del material a la escala de los planos cristalográficos.

La técnica más usada en difracción de rayos X es el método de polvos. En esta técnica se utiliza una muestra pulverizada de manera que se tengan muchos cristales orientados aleatoriamente para favorecer una distribución homogénea de orientaciones de los planos cristalográficos de la muestra. De esta manera la difracción producida incluirá la contribución de todos los planos del material. En los análisis modernos de cristales se utiliza un difractómetro de rayos X que tiene un contador de radiación que detecta el ángulo de incidencia y la intensidad del haz difractado. Un registro se encarga de graficar automáticamente la intensidad del haz difractado mientras el contador se desplaza por un goniómetro circular que está sincronizado con la muestra en un intervalo de valores de 2θ . De modo que los haces difractados pueden ser registrados simultáneamente [37]. Como resultado de la medición se obtienen gráficas de intensidad en función del ángulo de difracción (2θ). En la figura 4.3 se muestra un ejemplo de difractograma obtenido en muestras de lirio reportadas por el grupo de Satyanagalakshmi [14].

En el presente trabajo se utilizó un difractómetro marca Rigaku, modelo Smart-Lab. Este equipo cuenta con una fuente de rayos X de Cu, con una longitud de onda de 1.544 Å, apta para observar la estructura de las plantas utilizadas así como de las estructuras metálicas sintetizadas dentro de la estructura. Previo a la medición, las muestras fueron cortadas y molidas para emplear polvos para realizar las mediciones.

4.1.4. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Los espectrómetros infrarrojos son herramientas importantes para observar y analizar espectros vibracionales. Las características más relevantes de esta espectroscopía son las siguientes:

1. Si las moléculas están constituidas por átomos distintos, o tienen distinta distribución isotópica, o configuración, o se encuentran en ambientes distintos, entonces los espectros infrarrojos serán distintos.
2. Una sustancia definida puede identificarse por su espectro infrarrojo, puede considerarse el espectro de una sustancia como la huella digital de la sustancia.
3. Los espectros muestran bandas que son típicas de grupos funcionales particulares y que tienen localizaciones e intensidades específicas dentro de los espectros infrarrojos.
4. A partir de los espectros se pueden inferir las estructuras moleculares.
5. Las intensidades en las bandas del espectro de una mezcla son generalmente proporcionales a las concentraciones de las componentes individuales.

Existen dos tipos de espectrómetros infrarrojos, los dispersivos y los de transformada de Fourier. En este trabajo se utilizó un espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier o FTIR por sus siglas en inglés. Los espectrómetros infrarrojos con transformada de Fourier consta de tres elementos básicos: una fuente luminosa, un interferómetro de Michelson y un detector.

En la figura 4.5 se observa un diagrama de bloques de un espectrógrafo típico. Su funcionamiento es el siguiente: un haz colimado, proveniente de una fuente que emite en toda la región infrarroja, incide sobre un divisor de haz. El haz incidente se divide en dos haces perpendiculares de igual energía, uno de los cuales incide sobre el espejo móvil y el otro sobre el espejo fijo. Los haces son reflejados por ambos espejos y se recombinan al llegar al divisor de haz. Esto da lugar a una interferencia, la cual puede ser constructiva o destructiva dependiendo de la posición relativa del espejo móvil con respecto del espejo fijo. El haz resultante pasa a través de la muestra, en donde sucede una absorción selectiva de longitudes de onda y finalmente, llega al detector. Esto permite obtener curvas de intensidad en función del número de onda, donde cada banda corresponde a un modo vibracional. En la figura 4.5 se pueden observar un ejemplo que corresponde a un espectro IR tomados de muestras de Sargazo en un estudio realizado por el grupo de Raize [6].

Para este estudio se utilizó un espectrómetro marca ThermoScientific modelo Nicolet IS10. Este equipo permite realizar mediciones sin necesidad de una preparación previa de las muestras. Las mediciones nos darán información sobre la ocurrencia o no, de una interacción química entre la superficie de las plantas y el barniz que se usó para funcionalizarlas.

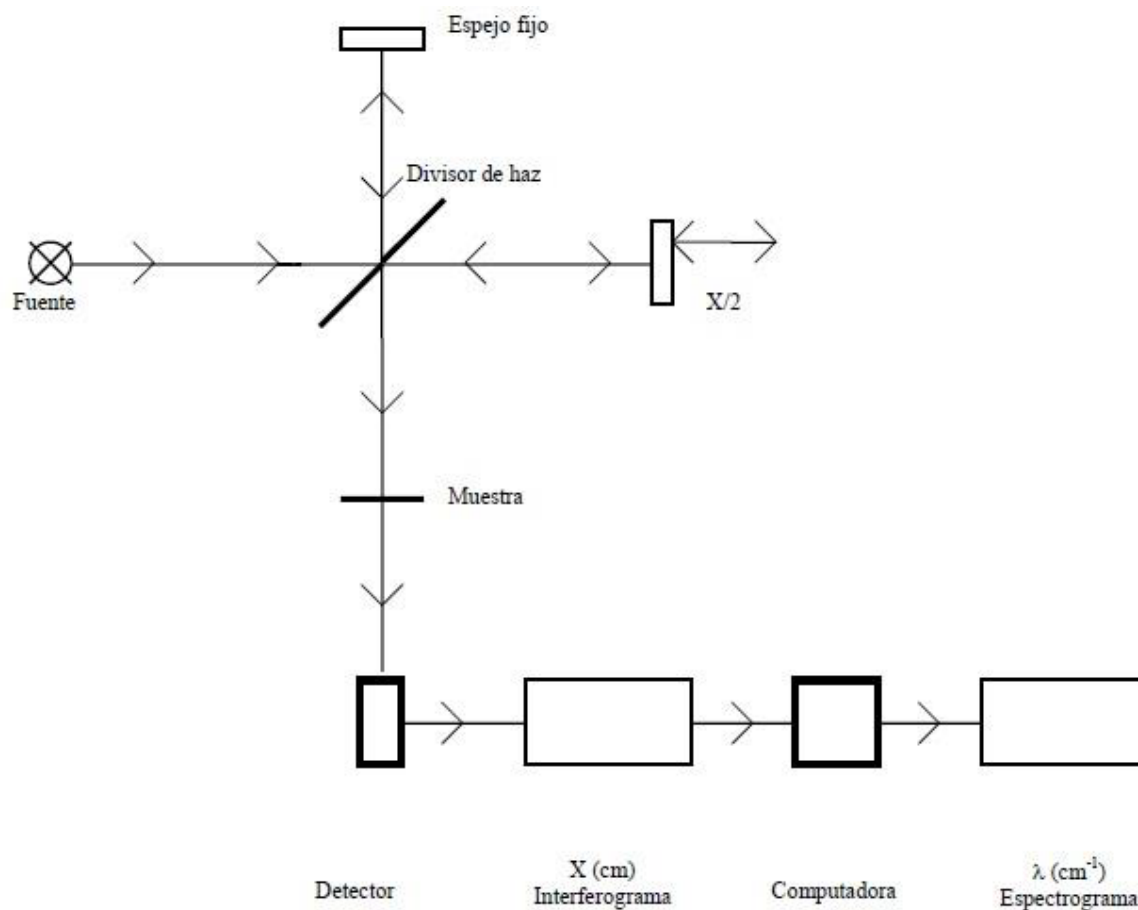


Figura 4.4: Esquema simplificado de un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier. [15]

4.2. Obtención de muestras

En el caso del sargazo se realizó un viaje de campo para la recolección de muestras, a la ciudad de Cancún, Quintana Roo, México, a la zona hotelera en Playa Delfines. LA recolección se realizó por la mañana para tomar la mayor cantidad de muestras, antes de la recolección rutinaria realizada por el gobierno del estado de Quintana Roo. Estas se empaquetaron y se enviaron a San Luis Potosí para el estudio. En la Figura 4.6 se muestra una fotografía de las muestras de Sargazo ya secas.

Las muestras de Lirio Acuático utilizadas fueron proporcionadas por la empresa “TEMA, Servicios y productos Ambientales S.A. de C.V.” las cuales ya venían secas y en trozos. En la figura 4.7, se muestra una fotografía del Lirio Acuático usando en este estudio.

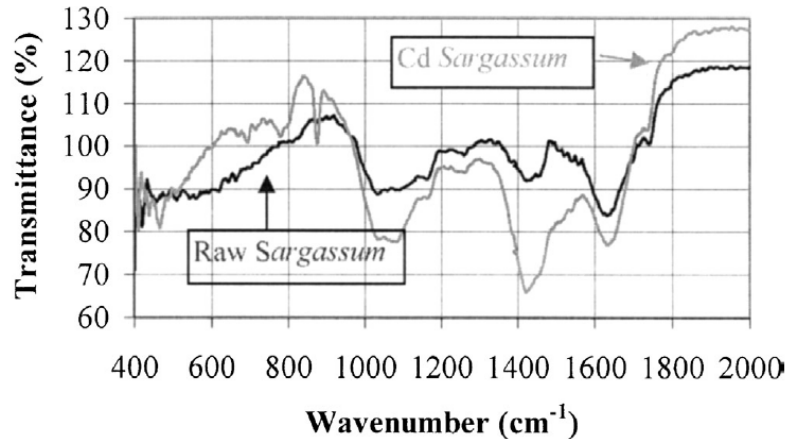


Figura 4.5: Ejemplos de espectros infrarrojos de sargazo utilizado para absorber Cadmio. Los espectros corresponden al sargazo prístino y al sargazo con cadmio absorbido [6].



Figura 4.6: Fotografía de sargazo recolectado y seco.

4.3. Procesos de transformación

Como un punto importante que motivó el presente trabajo, nos interesamos en proponer y analizar varias formas de usar el Sargazo y el Lirio Acuático como materia prima para la fabricación de un material *aplicable*. La fabricación de un material a partir de una materia prima se hace mediante uno o varios procesos de transformación. Para nuestro trabajo es importante poner atención en estos procesos de transformación ya que nos interesa analizarlos a la par que otros factores de las propiedades de los materiales obtenidos. Estos procesos transformativos engloban factores como el costo de materiales, la complejidad del proceso de fabricación y otros muy importantes como costo energético y las huellas de carbono y de agua. Factores que, en el contexto de este trabajo, han sido enfatizados ya que nos interesa incorporarlos en el análisis de viabilidad del material con la perspectiva de material sustentable.



Figura 4.7: Fotografía de Lirio Acuático seco y en trozos que fue proporcionado por la empresa TEMA.

En este trabajo se siguieron tres procesos diferentes. Uno se centró en el crecimiento de nanopartículas magnéticas dentro de la estructura porosa de las muestras vegetales. Los otros dos partieron de recubrir la superficie de las plantas con un barniz a fin de hacer su superficie hidrofóbica. Una vez que se hizo la superficie hidrofóbica, se realizó un segundo proceso que consistió en producir un filtro poroso destinado a separar aceites de agua. Finalmente, el tercer proceso propuesto fue el de usar las plantas hidrofóbicas para mezclarlas con un polímero y fabricar así un material compuesto de la especie invasora dispersa en una matriz polimérica. A continuación se presentan los métodos empleados en cada uno de estos procesos.

4.3.1. Síntesis de nanopartículas en estructuras vegetales

Se realizó el crecimiento de nanopartículas metálicas dentro de la estructura del lirio acuático y el sargazo. Las nanopartículas fabricadas fueron de magnetita (Fe_3O_4), debido a que en el grupo se cuenta con mucha experiencia en la síntesis de este material y la adaptación para incluir las plantas era directa. El proceso de ilustra en la figura 4.8. Inicialmente se realizó un lavado de las muestras de lirio con agua destilada. Las muestras se secaron en una placa de calentamiento, tras lo cual se sumergieron en una solución de tolueno con alcohol en proporción de 1:2 por 24 h [47]. Posteriormente se dejó secar nuevamente en la placa de calentamiento a $150\text{ }^\circ\text{C}$. Las muestras secas fueron sumergidas en una mezcla de sales de hierro, con concentraciones 0.2 M de cloruro férrico hexa hidratado (FeCl_3) y 0.1 M de cloruro ferroso (FeCl_2) en un total de 100 mL. Se mantuvieron durante 5 días en la solución tapada y sin agitación. Después se extrajeron y se sumergieron en una solución reductora de hidróxido de amonio (NaOH) al 10%, por 24 h. Finalmente se lavaron con agua corriente para retirar el exceso de nanopartículas y residuos de los precursores [47].

Para el caso del sargazo, el procedimiento es exactamente el mismo.

“Coprecipitación de Sales de Hierro”

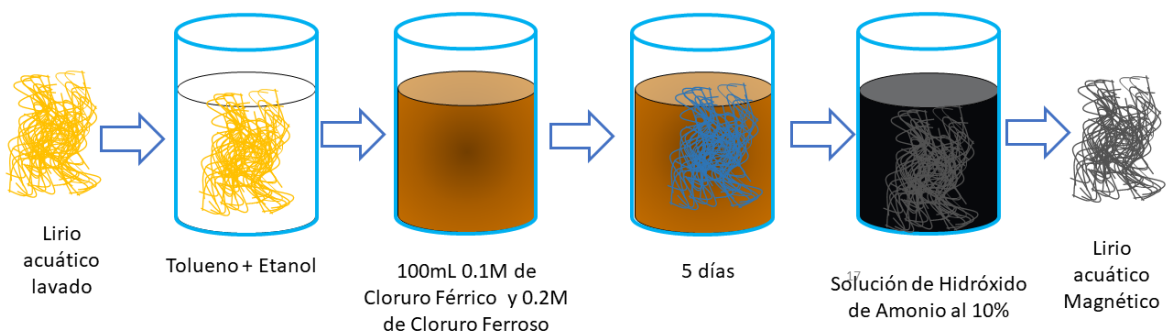
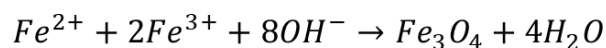


Figura 4.8: Diagrama del proceso de coprecipitación de sales de hierro en presencia del lirio acuático.

4.3.2. Moldeo

Como un paso importante para el procesamiento de las especies invasoras (sargazo y lirio acuático) se requería hacer piezas de forma y tamaño predeterminado a partir de las muestras secas y en trozos. Esto se pudo hacer mediante un proceso de moldeo en húmedo, el cual se ilustra en la figura 4.9. Para esto aprovechamos la naturaleza hidrofílica e higroscópica de las muestras para reblandecerlas en agua y posteriormente secarlas en forma compactada dentro de un molde. Para esto las muestras se lavaron con agua corriente para quitar la mayor cantidad de residuos que se encontraran en su superficie, tras lo cual se dejaron sumergidas en agua durante 5 min en agua para que estas la absorbieran y se rehidrataran. Una vez hinchadas por la absorción de agua, las muestras fueron colocadas en los moldes con la forma deseada, se mantuvieron bajo una pequeña pesa para generar presión mecánica en las muestras, hasta que se secaron. Las muestras secas matienen la forma del molde.

4.3.3. Funcionalización

Una vez conformadas las muestras vegetales, se procedió a realizar una funcionalización de éstas para hacer su superficie hidrofóbica. Esto se realizó utilizando un barniz de poliestireno (unicel) como se ilustra en la figura 4.10. El barniz se obtiene disolviendo el poliestireno en una mezcla de acetona con acetato de etilo en una proporción de 1:1.46 por cada gramo de poliestireno disuelto. Las muestras vegetales ya moldeadas fueron sumergidas en la solución, extraídas y dejadas al aire por 3-4 horas para volatilizar los solventes

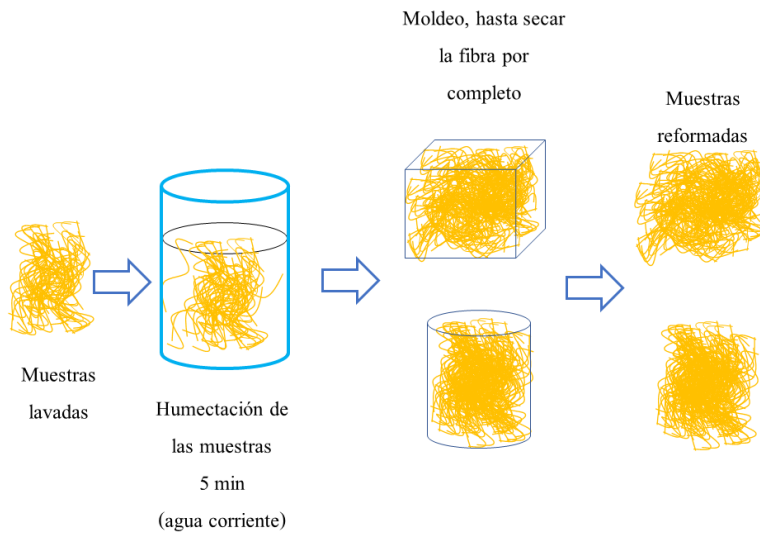


Figura 4.9: Diagrama del proceso de moldeo.

[69, 70].

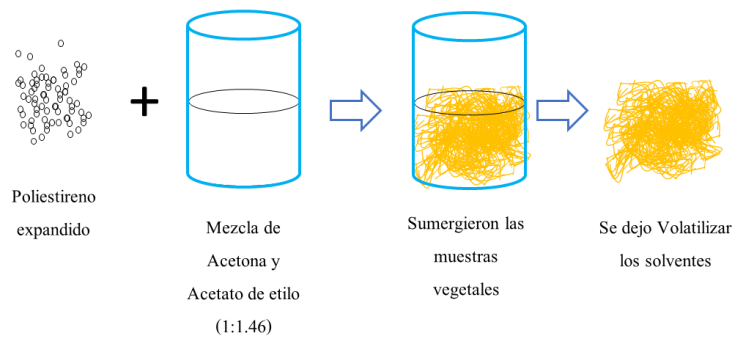


Figura 4.10: Diagrama del proceso de funcionalización del sargazo/lirio acuático con barniz de poliestireno.

4.3.4. Filtros

Una vez funcionalizada la muestra conformada esta puede utilizarse como filtro, debido a que por la forma en que se realiza el moldeo propicia la estructuración porosa de la muestra, además el recubrimiento realizado con poliestireno aumenta la compatibilidad con el aceite de la planta. Se realizaron pruebas de adsorción de agua y de aceite de los filtros para evaluar

su compatibilidad después del recubrimiento de poliestireno. Los filtros se pesaron en una balanza antes y después de sumergirlas para evaluar la capacidad de adsorción, el tiempo de inmersión fue de 5 min, tras el cual se dejó suspendido de manera que la cantidad de sustancia excedente, aceite o agua, no adherida se desprenda de la esponja, durante 5 min. Finalmente se realizaron pruebas para evaluar la capacidad del filtro para lograr la separación de aceite que se encuentre en agua.

4.3.5. Compósitos

Como se explicó, uno de los materiales que nos propusimos fabricar fueron compósitos hechos de sargazo/lirio acuático disperso en una matriz polimérica. Como polímero se eligió la resina de poliéster ya que ésta es líquida permitiendo manipularla y trabajarla con facilidad. Además, tiene la ventaja de que para obtener los materiales compósitos no requiere de ninguna maquina y solo es necesario colocarla en un molde y dejarla polimerizar. Para este trabajo se uso la resina de poliéster comercial marca Polyte® 33004-00. En cuanto a las plantas, se sabe que por su naturaleza hidrofílica no forman una buena interface con materiales poliméricos, afectando el desempeño de los compósitos. La solución más directa es funcionalizar las plantas para que su superficie sea hidrofóbica, haciendola compatible con el polímero y ayudando a una mejor adherencia entre ambos. En nuestro caso, contamos con sargazo y lirio acuático hidrofóbico luego de recubrirlos con el barniz de poliestireno. En este sentido se han fabricado compósitos usando lirio acuático y sargazo con y sin barniz con el fin de analizar como se adhieren al poliéster en los materiales compósitos. El proceso se muestra en la figura 4.11 y consiste en sumergir la muestra moldeada de sargazo o lirio acuático en la resina de poliéster y la mezcla se coloca en un molde donde se deja que polimerice el compósito.

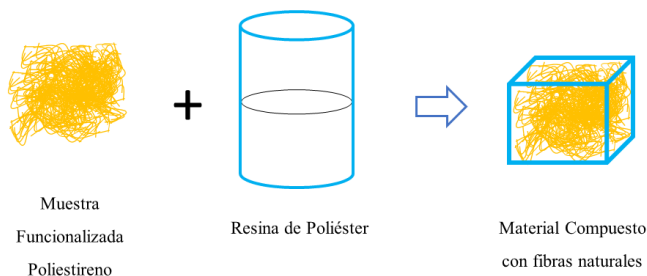


Figura 4.11: Diagrama del proceso de fabricación de los compósitos.

Finalmente, al compósito de poliéster solidificado se le realizó un corte transversal para analizar y evaluar la unión en la interface del sargazo (lirio acuático) con y sin barniz.

Capítulo 5

Resultados

En el siguiente capítulo se muestran y se discuten los resultados obtenidos durante el estudio realizado, estos se encuentran presentados de una manera similar a la presentada durante el capítulo anterior "Metodología". En un inicio se presentan los resultados de la caracterización elemental que se realizó al lirio acuático y al sargazo, posteriormente se encuentra el desarrollo de las aplicaciones propuestas durante el estudio.

5.1. Resultados de la caracterización elemental.

Los resultados de la caracterización elemental se presentan divididos según la técnica utilizada, donde se discuten en forma individual la información obtenida de lirio acuático y el sargazo. Inicialmente se presentarán los resultados de la realización de la microscopía.

5.1.1. Microscopía electrónica de barrido

Las micrografías obtenidas de la planta de sargazo mostraron una topografía con una gran cantidad de surcos, esto debido a que la planta al encontrarse seca reduce su volumen de manera que su superficie toma esta forma, esto se observa en la figura 5.1. Todas las estructuras del sargazo, los tallos en menor medida, presentan este tipo de topografía, esto debido a que por su naturaleza marina estas presentan una alta afinidad con el agua.

Los residuos de la estructura celular pertenecientes al lirio acuático se pueden observar en la Figura 5.2, se puede notar la estructura cavernosa que muestra la planta, esto principalmente para aumentar la flotabilidad de esta misma [50].

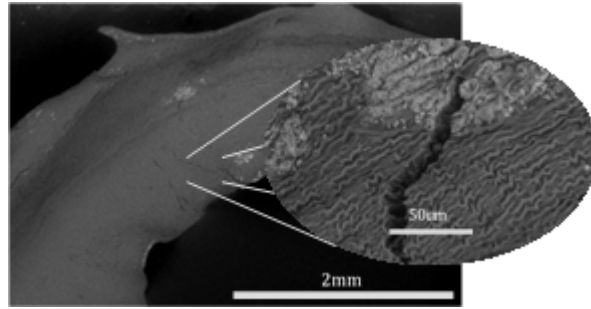


Figura 5.1: Micrografía por electrones retrodispersados de la hoja de sargazo.

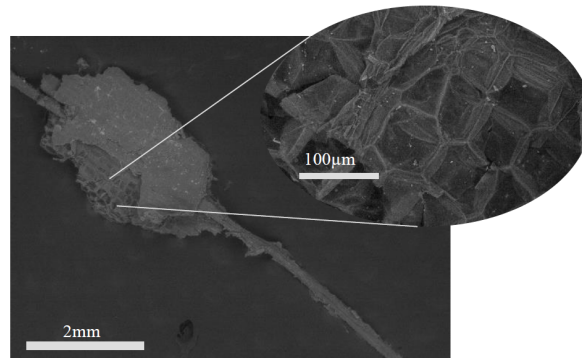


Figura 5.2: Micrografía por electrones retrodispersados del lirio acuático.

5.1.2. Análisis termogravimétrico

En los análisis termogravimétricos realizados a las plantas del sargazo, que se aprecian en la figura 5.3; podemos remarcar la constante degradación de la macroalga y los continuos cambios en las pendientes que suceden conforme aumenta la temperatura. Una de las principales componentes que presentan una degradación continua durante el rango de 200 °C hasta los 750 °C es la lignina, también destaca la degradación de la hemicelulosa que sucede en el rango de 480-650 °C. El último de los componentes estables es la celulosa que presenta un rango de degradación entre los 570-700 °C correspondiente a la celulosa [71].

Sin embargo por la naturaleza del sargazo, sus componentes pueden variar por la temporada del año así como por las sustancias a las que se expuso estando en el océano [7].

En la Figura 5.4 se muestra la curva, resultado del análisis termogravimétrico realizado a las plantas de lirio acuático. En ésta se observa una caída inicial entre los 50 °C y 150 °C, que podemos relacionar con los contenidos de humedad de las muestras. Debido a la baja temperatura de descomposición de la hemicelulosa, lignina y pectinas, podemos observar una degradación de la muestra alrededor de los 200 °C que culmina en una caída significativa cercana a los 300 °C, mostrando una masa residual de compuestos carbonosos [8, 72]. Es importante señalar que el comportamiento observado en la Figura 5.4 es similar al reportado por otras investigaciones [8, 72].

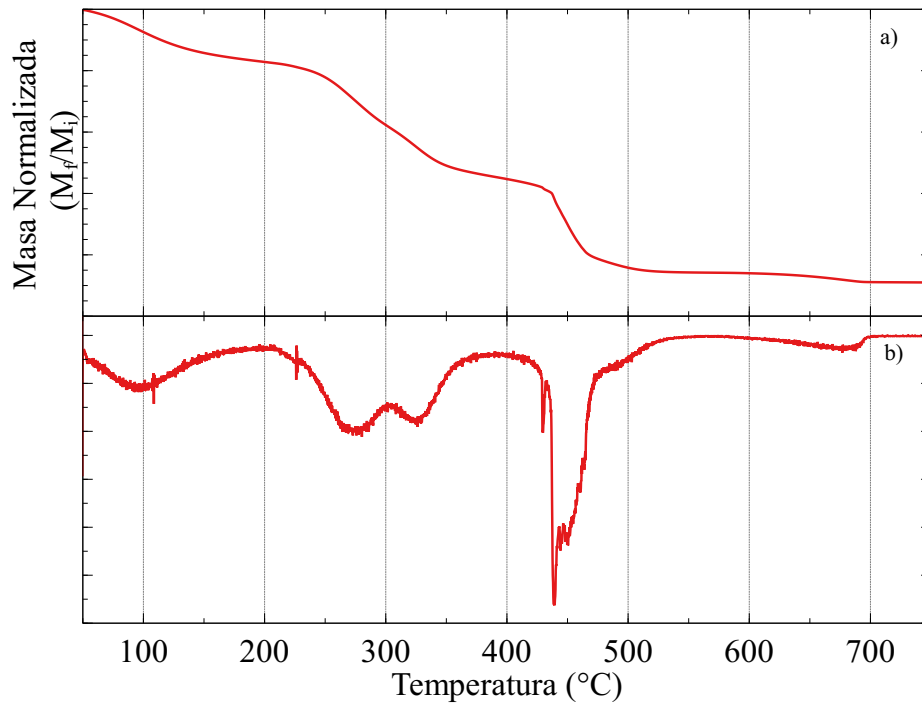


Figura 5.3: Análisis termogravimétricos del sargazo: a) curva original, b) derivada de la curva original.

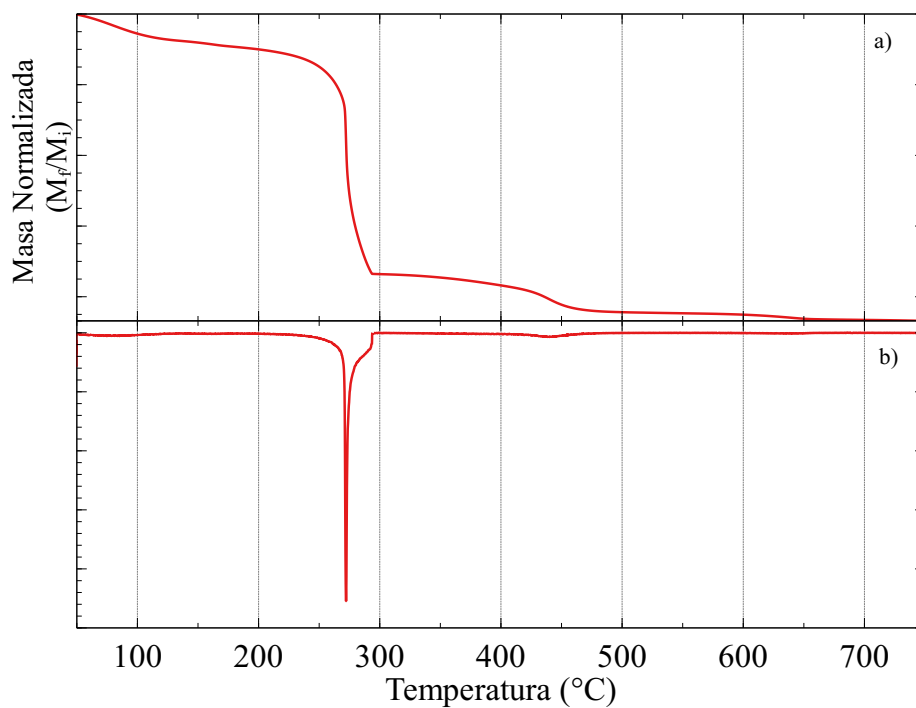


Figura 5.4: Análisis termogravimétricos del lirio acuático: a) curva original, b) derivada de la curva original.

5.1.3. Difracción de rayos X

Como se mencionó en capítulos anteriores, la difracción de rayos X es muy importante ya que permite observar las principales características de la estructura del material. En la figura 5.5 a) se observa el difractograma realizado a la muestra de lirio acuático. En este se observa un pico en $2\theta \approx 24^\circ$, el cual podemos asociar a la celulosa, según la información disponible en la literatura [9]. Además se observan picos que se pueden atribuir a contaminantes que fueron absorbidos por la planta cuando se encontraba viva. De manera similar para el sargazo, cuyo difractograma se muestra en la figura 5.5 b), se observa nuevamente el pico principal asociado a la celulosa en aproximadamente 24° [73, 74]. El resto de la señal, para ambos materiales, es consistente con una estructura no cristalina observada comúnmente en estructuras vegetales a base de celulosa.

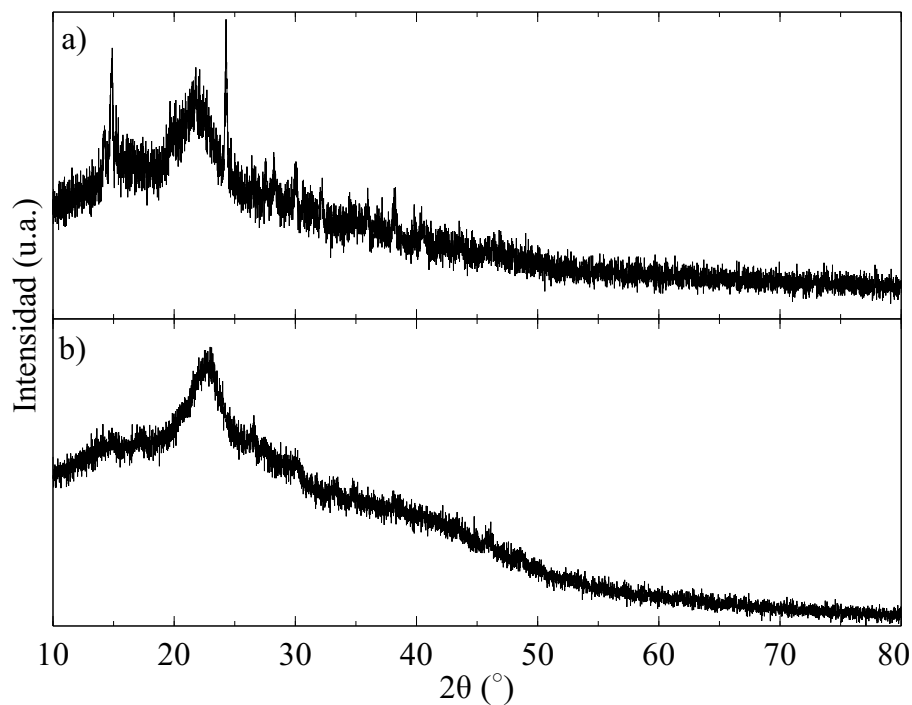


Figura 5.5: Difractogramas de rayos X de: a) la planta de sargazo y b) la planta de lirio acuático.

5.1.4. Espectroscopía infrarroja

Como se mencionó en el capítulo de materiales y métodos, en este trabajo se ha utilizado la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier, o FTIR por sus siglas en inglés. Para analizar los modos vibracionales de las muestras de lirio acuático y sargazo cuyas superficies fueron funcionalizadas o recubiertas con el barniz de poliestireno. Como se ha explicado, hemos usado un recubrimiento de poliestireno con el fin de hacer hidrofóbica la superficie del lirio acuático y del sargazo. En este caso, hemos usado la FTIR para analizar la señal del

material con el recubrimiento y lo hemos comparado con la señal de la planta no funcionalizada (prístina) y del barniz de poliestireno. Esto nos permite inferir si el barniz interacciona químicamente con la planta o no. Si no hay interacción, la señal resultante debe reflejar la superposición simple de las bandas de los espectros de referencia. Por el contrario, si observamos bandas nuevas en la señal sería un indicativo de que se ha producido un nuevo tipo de grupo químico.

A continuación se presentan los espectros de infrarrojo, comparando las referencias: el barniz y la planta prístina, con la planta recubierta de barniz. En las figuras 5.6 y 5.7, se muestran los resultados correspondientes al sargazo y al lirio acuático, respectivamente.

En ambas figuras se muestra el mismo espectro infrarrojo del poliestireno reciclado. En este espectro resaltaremos algunas bandas. La banda que se encuentra en 2920 cm^{-1} , se relaciona con la existencia de grupos metilos, mientras que la señal en 1452 cm^{-1} está asociada a enlaces dobles (C=C) en los enlaces aromáticos de los grupos estirenos. Por último, la señal en 694 cm^{-1} es característica de los enlaces carbono hidrógeno (C-H) [43, 75].

En la figura 5.6 observamos los espectros del sargazo, y del sargazo recubierto con poliestireno. Para el caso del sargazo prístino, las bandas destacables son las observadas en 3315 cm^{-1} que se puede asociar con polisacáridos y aminoácidos, esto de acuerdo a la correspondencia con enlaces nitrógeno-hidrogeno (N-H) y enlaces hidroxilo (O-H). Por su parte, la banda en 1598 cm^{-1} está relacionada con enlaces tipo carbonilo (C=O) y nitrilo (N=O), que se pueden asociar con ésteres y pectinas presentes en el sargazo [76].

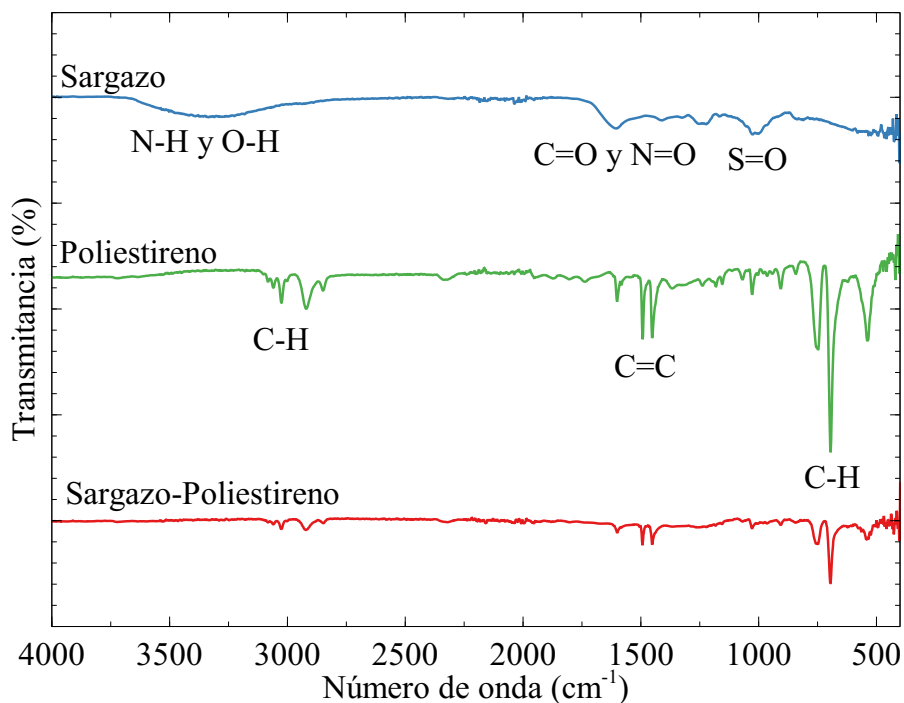


Figura 5.6: Espectro infrarrojo del sargazo recubierto con poliestireno reciclado.

Finalmente, la banda ubicada en 1026 cm^{-1} , se asocia a grupos sulfonados (S=O), así

como a algunos polisacáridos y almidones presentes en la muestra [76]. Por otro lado, en el espectro del sargazo funcionalizado con poliestireno se observa claramente la presencia de las señales características del poliestireno, pero notamos que no se perciben las señales del sargazo prístino. Esto lo hemos atribuido a que la intensidad de las señales del sargazo es muy baja comparada con las intensidades de las señales del poliestireno.

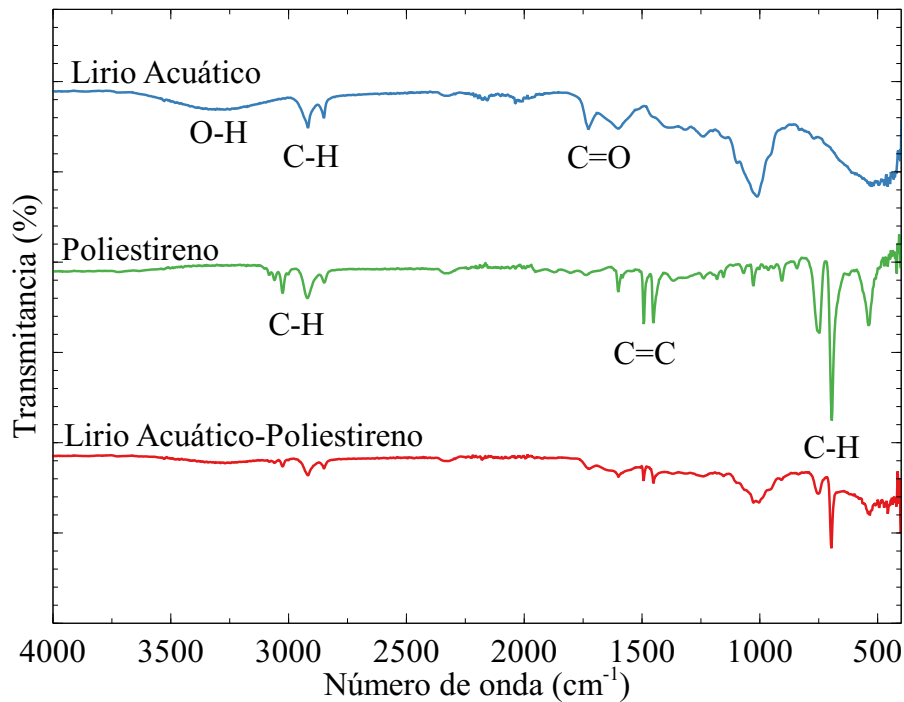


Figura 5.7: Espectro infrarrojo del lirio acuático recubierto con poliestireno reciclado.

En la figura 5.7, observamos los espectros correspondientes a el lirio acuático tanto prístino como recubierto de poliestireno. La primera banda resaltada centrada en 3300 cm^{-1} , se asocia a grupos hidroxilo (O-H), la banda 2912 cm^{-1} corresponde a grupos metilenos (C-H) y el pico centrado en 1724 cm^{-1} se atribuye a grupos carbonilos (C=O) [76].

De la misma forma que en el caso del sargazo, se observa que tras el recubrimiento aparecen las señales característicos del poliestireno, así como una atenuación de las bandas, en especial la que aparece en 3300 cm^{-1} . Como referencia, se agregó una tabla en los anexos, encontrada en la literatura, con información sobre las bandas presentes en cada uno de los espectros IR del sargazo y del lirio acuático. Los espectros mostrados anteriormente, figuras 5.6 y 5.7, muestran como no aparecen señales nuevos modos vibracionales, por lo que podemos afirmar que la funcionalización realizada no crea nuevos grupos funcionales. De modo que el poliestireno solo forma una capa suuercial unida por interacciones débiles.

5.2. Procesos de transformación

Luego de la caracterización estructural, nos interesamos en procesar ambas especies, el lirio acuático y el sargazo, considerándolas como materia prima, con el fin de mostrar conceptos de posible uso o aplicación. Como se mencionó al argumentar la justificación del trabajo, nuestra motivación ha sido la de usar estas especies como una materia prima que es barata, abundante y renovable para buscar desarrollar materiales funcionales.

Por lo anterior, se propusieron tres tipos de materiales funcionales elaborados con lirio acuático y con sargazo. Como vamos a ver, estos tres materiales son ejemplos de tres procesos diferentes en los que varía la complejidad del proceso de fabricación (entiéndase costo de materia prima, pasos necesarios y costo de energía para producir). A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos diferentes materiales. El procesado se dividió en tres principales enfoques, en el primero se llevo a cabo el crecimiento de nanopartículas metálicas, magnéticas, en el interior del sargazo y del lirio acuático. Para el segundo y tercer enfoque, se inició por moldear tanto el lirio así como el sargazo y posteriormente se ha recubierto con el barniz de poliestireno. Este recubrimiento de barniz tiene como objeto hacer hidrofóbica la superficie. Una vez que se tiene la pieza moldeada y con la superficie hidrofóbica, se obtuvieron: (a) filtros porosos que permiten separar aceites del agua o bien, (b) se pueden mezclar con otro polímero para producir un material compuesto.

5.2.1. Plantas invasoras con nanopartículas metálicas

En la Figura 5.8 a) se observa el lirio acuático con nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4), estas presentaron un cambio de coloración y comportamiento coherente con las propiedades dadas con las nanopartículas, ya que estas son atraídas por el campo magnético de un imán. Para el caso del sargazo, en la figura 5.8 b) se puede observar como este es atraído por un imán, sin apreciarse un cambio de coloración, principalmente porque las plantas de sargazo son naturalmente color marrón [50].

Para observar cambios morfológicos creados durante el crecimiento de las nanopartículas se ingresaron las muestras en el SEM, en el caso del lirio acuático se observaron pequeños residuos superficiales de partículas metálicas, esto se observa en la Figura 5.9. En esta imagen destaca como la superficie de la planta se encuentra dañada, esto se le atribuye a la exposición a las sustancias utilizadas durante la síntesis de las partículas metálicas.

En la figura 5.9 se pueden apreciar pequeñas partículas metálicas que se observan en la superficie, estas son principalmente residuos de las sales metálicas que se redujeron fuera de las estructuras vegetales y se adhirieron a la superficie de manera que no se retiraron durante los lavados realizados.

En la Figura 5.10 se puede observar estructuras residuales de las paredes celulares, es notable que se encuentran estructuras metálicas en el acercamiento indicado en la imagen.



(a)



(b)

Figura 5.8: Fotos de: a) 1.-lirio acuático con partículas metálicas y 2.- lirio prístino. b) sargazo magnético

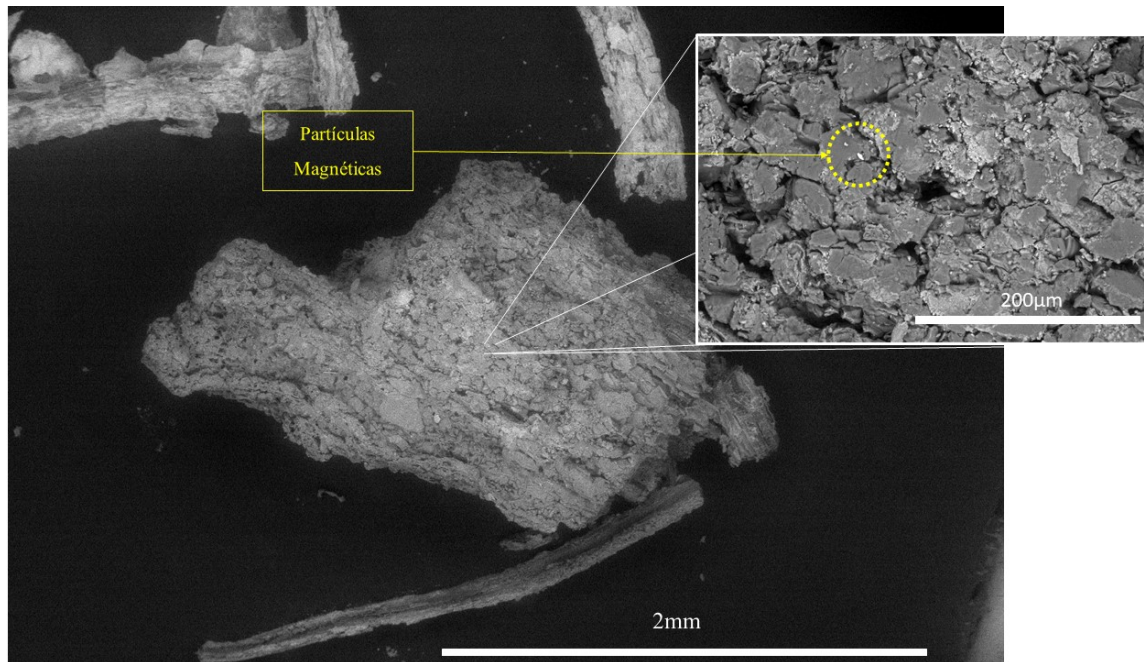


Figura 5.9: Micrografía por electrones retrodispersados del lirio acuático, con aumento a aglomerado de partículas metálicas.

Por último se debe resaltar, la existencia de regiones mas claras en la micrografía, debido a que la imagen se esta generando con electrones retrodispersados, lo que implica que la tonalidad de la imagen se le puede atribuir a la densidad atómica de los materiales que se observan, de modo que en estas regiones se puede afirmar la existencia de materiales metálicos, los cuales se encuentran dentro de las estructuras de las especies estudiadas.

En la Figura 5.11, se observa la micrografía donde se puede observar como la superficie del sargazo no sufrió cambios notables tras el proceso donde se realizaba el crecimiento de las estructuras metálicas dentro de las muestras estudiadas, esto sucedió principalmente debido a la propiedad de protección con la que cuentan las macroalgas. Estas deben enfrentarse a cambios impredecibles en el pH del agua que ocurren a mar abierto, de igual forma, en esta figura se puede observar un aglomerado de las nanopartículas metálicas.

Al igual que en el caso de el lirio, en la figura 5.12 se pueden observar las regiones donde se encuentra una mayor cantidad de metales adheridos en el material; a diferencia del lirio, en la imagen del sargazo se pueden identificar estas regiones de manera sencilla, uno de los motivos posibles de que este fenómeno suceda, es la superficie rugosa y la resistencia química que presenta el sargazo; es decir, gracias a la gran cantidad de bordes que presenta, hay pequeñas zonas donde pueden verse atrapados los componentes requeridos para que suceda la reacción química; que al iniciar, crecen sin control y crean esta corteza metálica en vez de partículas. El otro motivo, es que la resistencia química de la planta de sargazo interviene en mantener estas estructura rugosa de manera continua, a diferencia del lirio acuático el cual se disuelve cuando ingresa a zonas con pH que se encuentren en los extremos alcalino o ácido [8].

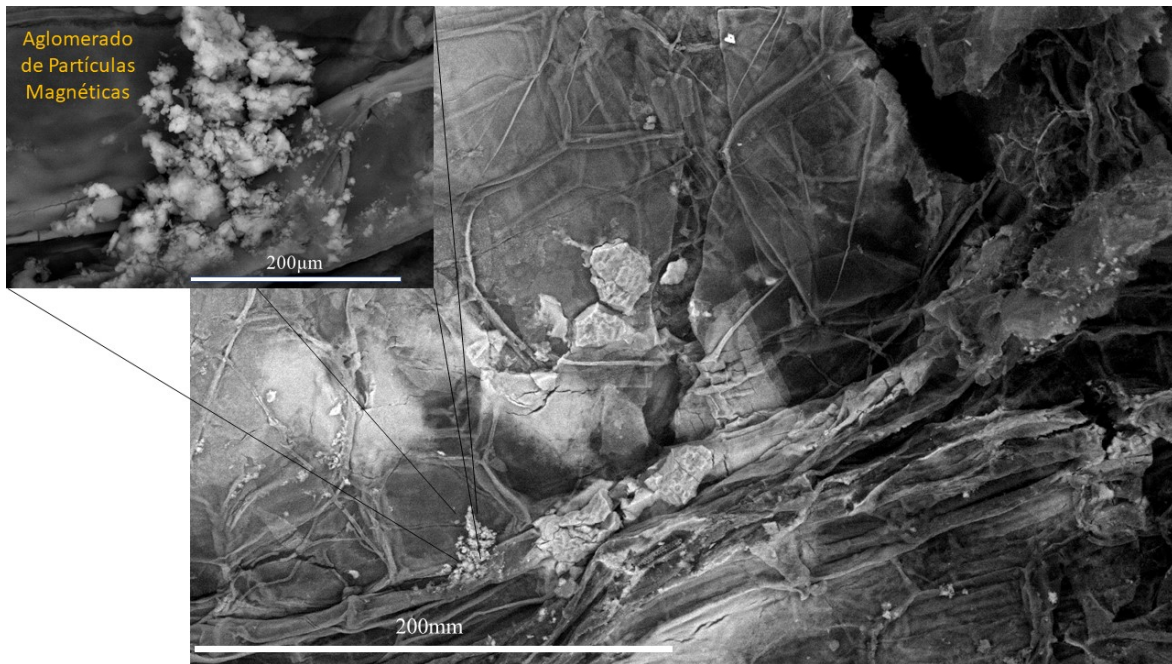


Figura 5.10: Micrografía por electrones retrodispersados del lirio acuático con nanopartículas metálicas

Para conocer de forma directa los componentes elementales de las muestras, de manera que podamos confirmar la existencia de componentes metálicos, en específico resaltamos los picos correspondiente al hierro, el cual es el que intencionalmente integramos en el material.

Los resultados de esto se presentan en la figura 5.13, en donde se observa un gran contenido de diferentes elementos; que se pueden atribuir tanto a la síntesis de las partículas metálicas como a la zona donde la planta creció y se desarrolló, Además, las evidencias visuales y los resultados de EDS nos permiten confirmar la existencia de las partículas metálicas en las especies trabajadas.

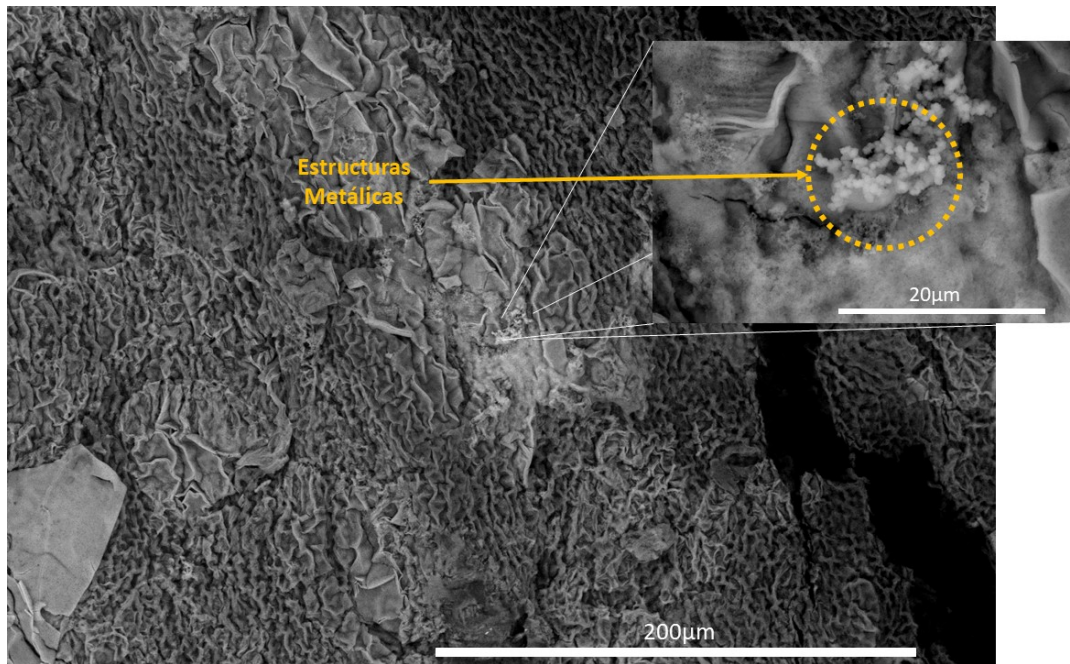


Figura 5.11: Micrografía por electrones retrodispersados de la macroalga de sargazo con nanopartículas metálicas.

5.2.2. Moldeo

En la figura 5.14 se observan conformaciones realizadas del sargazo y del lirio acuático, en esta se observa como por la técnica utilizada se pudo organizar los materiales de la forma deseada, teniendo este método pocas limitaciones. Una vez conseguida la forma deseada, procedimos a realizar la funcionalización con poliestireno.

5.2.3. Funcionalización

En la Figura 5.15 se muestra una micrografía de una hoja de sargazo recubierta con el poliestireno disuelto, en esta se aprecia como el recubrimiento de poliestireno no logra crear una cobertura homogénea sobre la superficie del sargazo, esto se atribuye al método de recubrimiento que no es completamente efectivo, sin embargo la parte recubierta se mantiene adherida a la superficie de forma firme.

5.2.4. Compósitos

En la figura 5.16 se puede observar los cambios del sargazo reformado conforme se realizan la funcionalización, y la integración de este a una matriz polimérica.

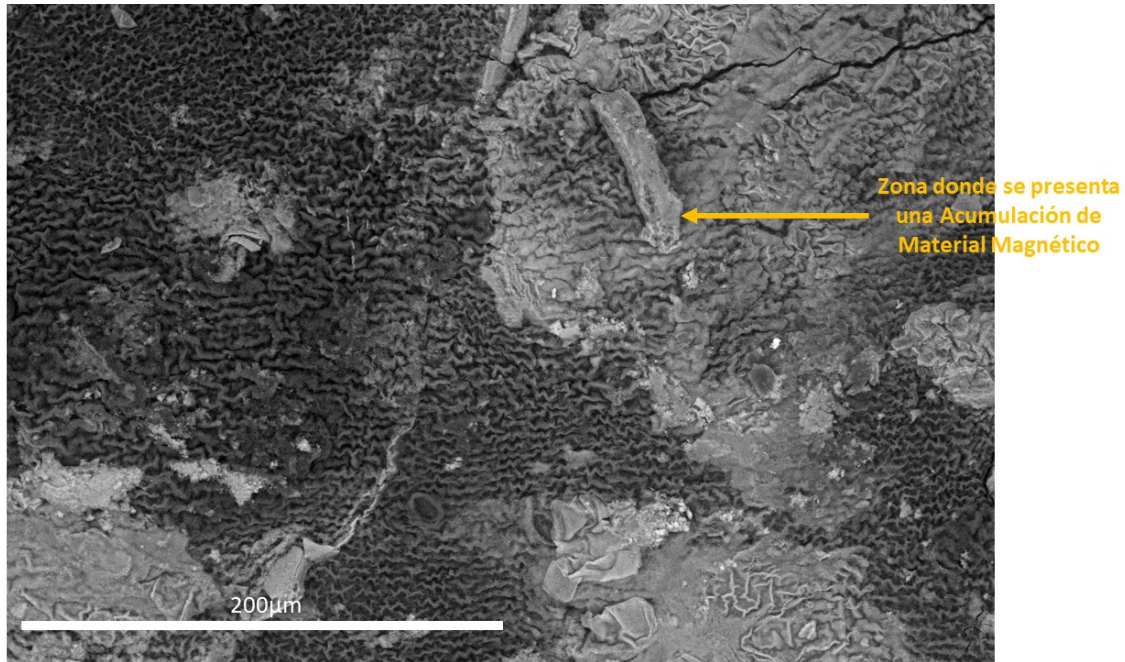


Figura 5.12: Micrografía por electrones retrodispersados de la planta de sargazo, se observan las regiones donde existe una mayor acumulación de metales.

En la figura 5.17 se puede observar los cortes transversales para observar la encapsulación del sargazo y su compatibilidad con la resina de poliéster. Dentro de la figura 5.17 b) se puede observar como las plantas de sargazo no mantuvieron la unión con la resinas debido a que éstas corresponden a las muestras que no se recubrieron previamente con el poliestireno disuelto, mostrando así que el recubrimiento mejora la compatibilidad del sistema.

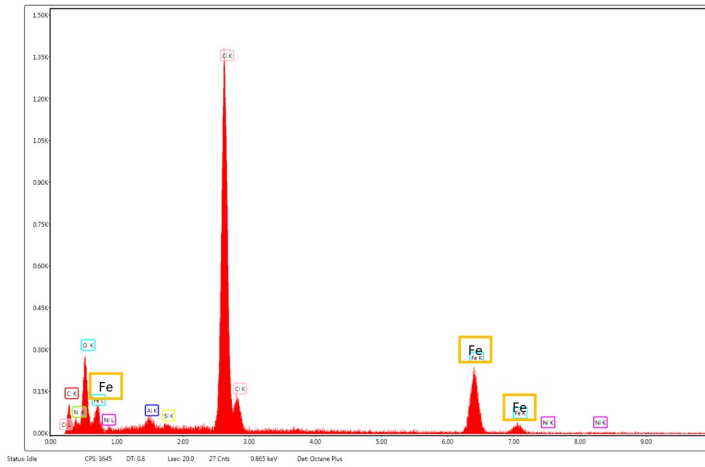
5.2.5. Filtros

En la Figura 5.14 se pueden observar una imagen de los filtros utilizados, al conformar los filtros con el poliestireno disuelto, en el cual el principal cambio apreciable está en el hecho de que en algunas secciones del filtro se le nota un brillo plastificado por el recubrimiento de poliestireno.

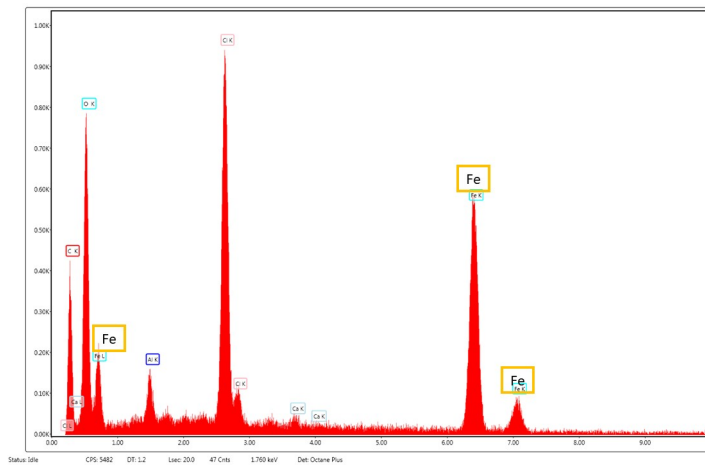
De las pruebas realizadas de adsorción se obtuvieron los datos mostrados en los cuadros 5.1 y 5.2, en estos se aprecia como tras la funcionalización de los filtros, se alteraron las propiedades hidrofóbicas de estos, consiguiendo tener una mayor afinidad con el aceite.

Con los datos obtenidos se aplicó una ecuación de proporción como la que se muestra a continuación:

$$%Q = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100$$



(a) Lirio Acuático



(b) Sargazo

Figura 5.13: Espectros de energía dispersiva (EDS) de las muestras de lirio acuático y sargazo magnetizadas.

Muestra	Masa inicial (M_i) [g]	Masa Final (M_f) [g]
F241	8.59	11.42
F242	8.52	10.99
F243	8.10	10.93
F244	7.87	10.15
F245	7.48	10.00
Promedio	8.11	10.70

Cuadro 5.1: Cambio de masa por la adsorción de agua en el filtro.

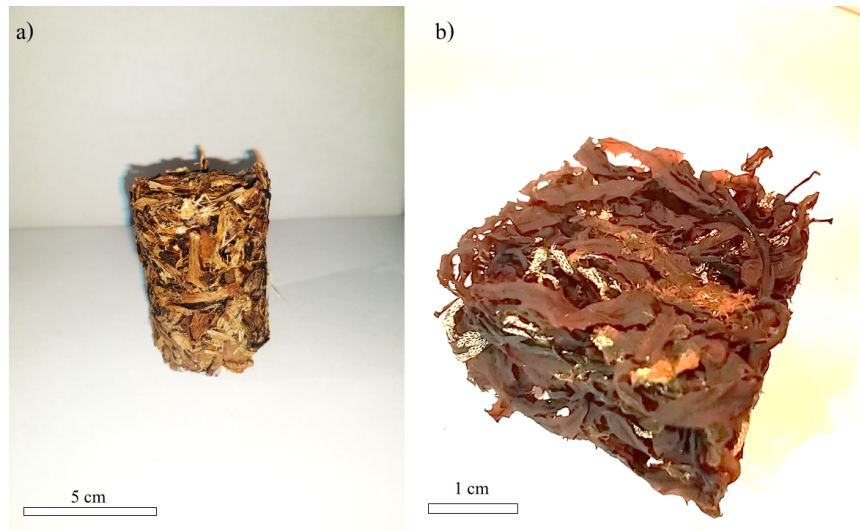


Figura 5.14: Fotografía de las muestras moldeadas: a) lirio acuático y b) sargazo reformado

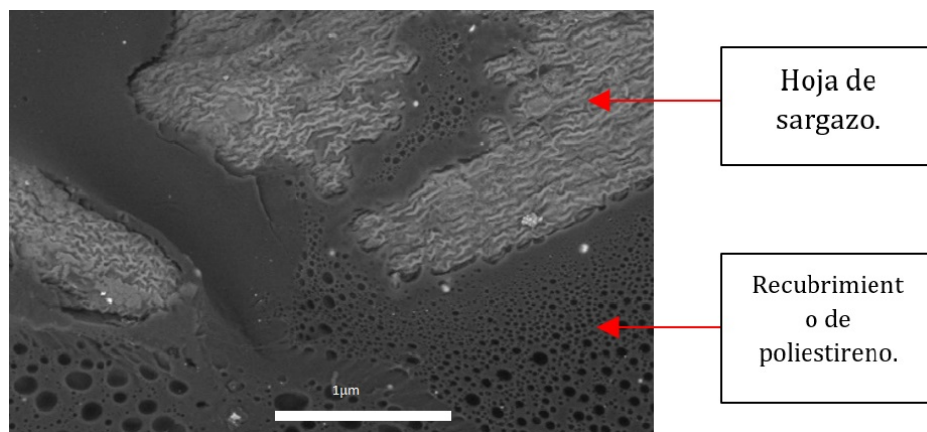


Figura 5.15: Micrografía por electrones restrodispersados de hoja de poliestireno recubierto de poliestireno reciclado.

Con la cual se obtuvo para cada caso el porcentaje en masa que el filtro que puede adsorber, de modo que entre mayor sea el valor de $%Q$ el filtro será más efectivo en retener la sustancia. En el cuadro 5.3 se observan los valores resumidos de $%Q$, en esta se aprecia la tendencia de que es compatible con el aceite, ya que en promedio puede adsorber poco más de dos veces la masa del filtro en aceite, a diferencia del caso del agua, la cual sólo adsorbe poco menos de la tercera parte de la masa del filtro.

Para la separación del agua se realizó una última prueba para lograr observar la capacidad del filtro para la separación del aceite en agua, para esto se agregaron 2 g de aceite a 100 mL de agua desionizada, en la figura 5.18 se aprecia lo efectivo que logró ser el filtro en la separación, imágenes del proceso se pueden observar en anexos.

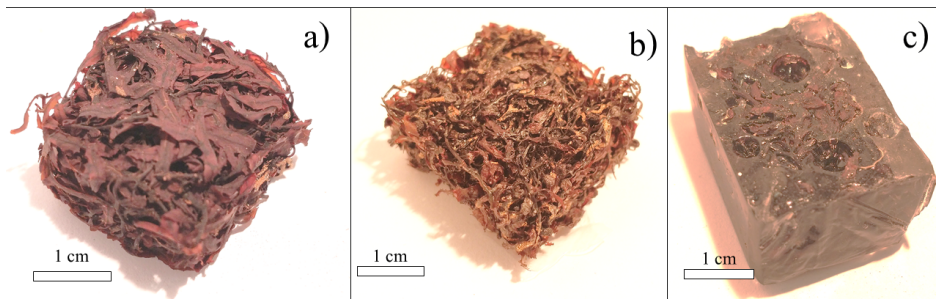


Figura 5.16: Fotografías de la planta de sargazo a) reformada por medio del moldeo, b) recubierto de poliestireno reciclado y c) compuesto de sargazo y poliéster

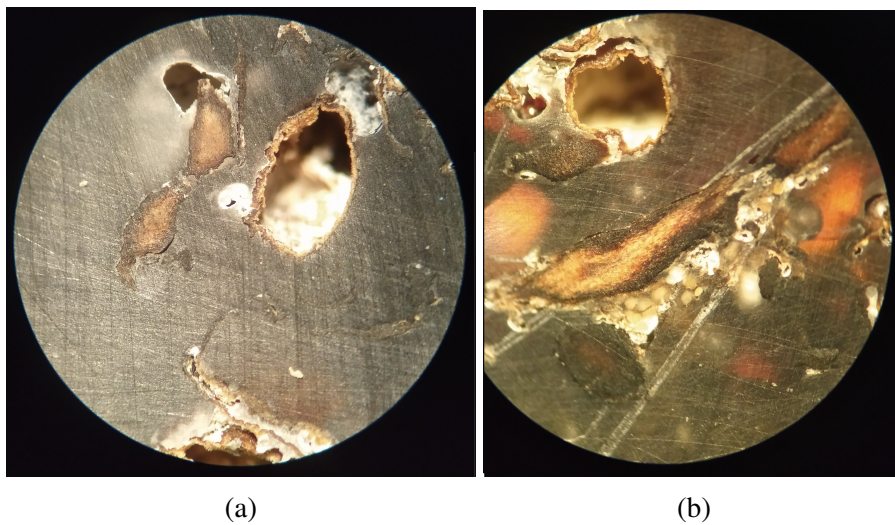


Figura 5.17: Cortes transversales de: a) compuesto de sargazo recubierto con poliestireno reciclado y b) compuesto de sargazo sin recubrimiento.

Muestra	Masa inicial (M_i) [g]	Masa Final (M_f) [g]
F241	8.59	28.26
F242	8.52	26.83
F243	8.10	26.89
F244	7.87	25.04
F245	7.48	23.18
Promedio	8.11	26.04

Cuadro 5.2: Cambio de masa por la adsorción de aceite en el filtro.

Muestra	%Q Agua	%Q Aceite
F241	32.94	228.98
F242	28.99	214.90
F243	28.30	231.97
F244	22.92	218.17
F245	33.68	209.89
Promedio	29.35	220.78

Cuadro 5.3: Cambio de masa por la adsorción de aceite en el filtro.



Figura 5.18: Filtro de lirio recubierto separando aceite de agua.

5.3. Valoración del enfoque sustentable de los procesos de transformación

A continuación se presenta un análisis de los procesos que hemos aplicado. En un inicio, se presenta un análisis de los procesos de producción que son necesarios para obtener los materiales que hemos desarrollado. Para continuar, con la valorización de los materiales sustentables fabricados.

5.3.1. Recapitulación de aplicaciones y procesos de transformación

En ambos casos, el del lirio acuático y del sargazo, se evaluó el proceso de producción que se seguía, de manera que se pudiera enfocar las secciones donde se tuvo influencia, y se pueda observar y comentar de forma objetiva que aspectos pueden mejorarse.

Sargazo

1. **Recolección** → Se realizó durante un viaje de campo, fuera de las fechas donde ocurrían las mayores arribaciones, pero al no estar tan alejada, aún se encontraban residuos de sargazo en la playa. Durante la investigación previa al viaje y se encontró información de que en la zona el gobierno municipal recolecta los residuos de las arribaciones y los está desechando, incinerando o se utilizan como insumos agroindustriales. → Por lo que se debe buscar hacer contacto con el estado para informar de las aplicaciones propuestas de manera que sea viable aprovechar estos residuos y no sean simplemente desechados. Su explotación estará limitada por las condiciones en que sea recolectado, esto debido a que las arribaciones no son fenómenos regulares, por lo que la producción de materiales a base de sargazo debe considerar un movimiento de ubicación a donde suceda los fenómenos que necesita.
2. **Traslado** → Se trajo como embalaje documentado durante el regreso del viaje de campo antes mencionado → No es viable el transporte de este tipo de recursos, de manera que estos deben ser utilizados en la zona donde se extraen o en su defecto en una zona de concentración cercana, entre mayor sea la distancia el costo de producción se verá afectado.
3. **Tratamiento** → Está íntimamente relacionado con la recolección, en nuestro caso se refiere a la separación de la arena del sargazo, además de otras sales que están incrustadas en él, también se considera el secado tras la recolección o la limpieza → Se puede resolver parte de esto cuando la recolección se realiza dentro del agua, aunque se pueden proponer algunas otras alternativas nuevas.
4. **Procesamiento** → Se desarrollaron y aplicaron procesos de transformación, que permitieron el llegar a materiales sustentables, teniendo en cuenta que es el trabajo desa-

rollado durante el estudio. → El alcance de los procesos propuestos permitió la creación de materiales con valor agregado. Sin embargo, es necesario evaluar los procesos presentados para la obtención de datos comparables, con información como los gastos energéticos, huella de carbono o hídrica. Es importante considerar que el sargazo es un ser vivo, el cual tiene ciclos biológicos, lo que conlleva a que según donde y/o cuando sea recolectado este puede presentar propiedades diferentes, las que podrían interferir de manera positiva o negativa en las propiedades finales del producto.

5. **Aplicación** → Dentro del estudio se desarrollaron principalmente los materiales. Se propusieron algunas aplicaciones, como la relacionada con la separación de aceite en agua. Sin embargo para los materiales compuestos y las nanopartículas no esta clara una aplicación real. A manera de ejemplo, podemos mencionar situaciones como la integración de paneles de materiales compuestos como materiales de construcción o en el caso de las nanopartículas permitiría usarlas como base de un material para aislamiento electromagnético → Con los materiales fabricado sigue el hacer esta transición tecnológica, por lo que para enfocar el material de manera optima es necesario estudio mas profundo de las propiedades de los materiales fabricados, esto para aprovechar su máximo potencial.
6. **Venta o Implementación** → No se realizaron avances dentro del estudio. → Una vez el proceso de producción continué se podrá alcanzar. Los avances realizados dentro del estudio sientan las bases para la presentación de un producto de valor agregado y atractivo económico, por lo tanto es necesario continuar con el desarrollo del proceso para alcanzar este punto, ya que presenta la meta final de todo el desarrollo.

Con lo ya expuesto en el caso del sargazo, aún se debe realizar una gran cantidad de trabajo, debido a que se debe encontrar actores importantes en las diferentes etapas que identificamos, para que cubran las necesidades y realicen procesos, esto no significa que las ideas expuestas no sean reales. Sin embargo parte importante del desarrollo recae en la formación de una red de trabajo en donde no solo algunos sean los beneficiados, si no que la sociedad debe ser la que debe verse beneficiada.

Lirio Acuático

1. **Recolección** → Esta estuvo a cargo de la Empresa TEMA¹. Esta se realiza en diferentes mantos acuíferos de México, realizado por los pescadores locales. → Si bien la inclusión de los pescadores es un avance en el apoyo social, es necesario desarrollar una formación especializada por parte de los habitantes, de modo que la recolección sea una actividad propia de los habitantes de la región. El crecimiento del lirio acuático al igual que el sargazo esta regido por sus ciclos biológicos, por lo cual su explotación puede estar regido por temporadas de recolección, esto en la medida que pueda ser cultivado.

¹Mencionada en la Capitulo 4 Materiales y Métodos

2. **Traslado** → De igual manera lo realizó la empresa TEMA → Existen dos puntos a resaltar, (a) esta actividad puede eliminarse o reducirse si se hace de manera local, siendo los habitantes de la región los que se haran cargo del resto del proceso de producción, o (b) hacerlo para llevarlo a una planta equipada para realizar procesos mas complejos, siendo este último el que se realiza actualmente. Ambos casos aportaran beneficios a comunidades locales a donde se desarrolle el proceso, es viable utilizar ambos sistemas según las condiciones y capacidades de recolección.
3. **Tratamiento** → Realizado por la empresa TEMA, durante un proceso interno llamado “Selección”. → La comunicación debe mejorar para conocer a fondo el proceso antes mencionado. Lo que nos permitirá encontrar candidatos que lo puedan llevar a cabo, o bien, buscar mejorarlo.
4. **Procesamiento** → En este punto del proceso comenzamos a intervenir, esta parte es lo que se realizó durante este trabajo. → Las consideraciones pertinentes al lirio acuático en principio son similares a las del sargazo. Es necesario realizar los cálculos de datos comparables, el lirio también esta limitado por sus ciclos biológicos. Sin embargo a diferencia del sargazo el lirio se encuentra en zonas localizadas de México y el mundo, permitiendo una explotación en sitios fijos de manera regular.
5. **Aplicación** → Al igual que en caso del sargazo, se obtuvieron materiales, los cuales en principio, tienen la capacidad de tener aplicaciones en la filtración de aceite en agua, paneles plasticos en la construcción o blindaje electromagnético. → De manera que el siguiente paso es la transición tecnológica, en la cual se mostraría a la empresa las aplicaciones propuestas y se trabajaría para capacitar a los empleados en los desarrollos en los que la empresa este interesada. Sin embargo ésta se ha visto detenida por la contingencia sanitaria debido al COVID-19, se estima que cuando esto termine se podrá presentar el desarrollo a la empresa para su implementación en escenarios reales. Los desarrollos propuestos a la empresa o las aplicaciones que surjan se debe buscar que se mantengan alineadas con la idea de la sustentabilidad.
6. **Venta o Implementación** → No se ha alcanzado esta etapa de desarrollo → Como se mencionó, con el caso del sargazo, esta es la meta final del desarrollo del material, por lo que en la producción se generan las características atractivas para los que buscan comercializarlos. En el caso del lirio se conoce ya una empresa que tiene el interés de aprovecharlo, por lo que se deben proponer propuestas con orientación sustentable.

La empresa TEMA se dedica a la explotación del lirio acuático entre otros productos, con su acercamiento a la ciencia busca conseguir un mayor desarrollo económico, esto sin descuidar el medio ambiente, ya que presenta alternativas sustentables a industrias. Al ingresar nosotros en este proceso de desarrollo estamos interviniendo en esta red de producción ya armada; en la que estamos creando propuestas novedosas con las ideas de las empresas ya existentes.

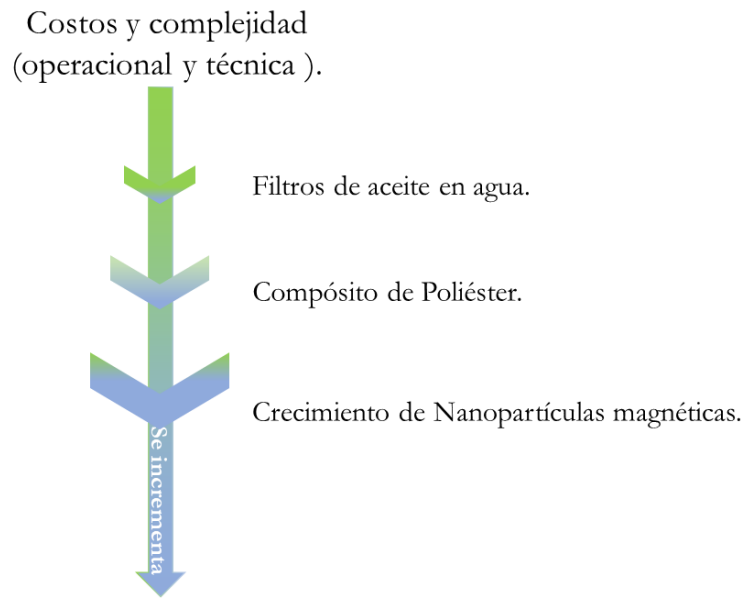


Figura 5.19: Diagrama de valorización de las aplicaciones y procesos propuestos.

5.3.2. Valoración de los procesos de transformación aplicados.

En la figura 5.19 se observa en esquema donde se acomodan los materiales propuestos durante el estudio, según su incremento en los costos y complejidad, entendida como operacional y técnica, donde la operacional se refiere a la infraestructura necesaria para realizar el proceso, y la técnica está relacionada con las capacidades y conocimientos necesarios. En un inicio se presentan los filtros de separación de aceite en agua, esto debido a que de los procesos es el que requiere una infraestructura mas simple, además de que los conocimientos presentados para la elaboración de estos, pueden ser fácilmente adquiridos, ya que las metodologías presentadas pueden ser replicadas. El segundo proceso que se observa en la figura 5.19 es la fabricación de compósitos de poliéster. Este proceso, que en principio es muy similar al de los filtros, aumenta su grado de complejidad con el agregado de la resina de poliéster, que debido a su introducción aumenta los requerimientos, ya que al trabajar con resinas de poliéster es necesario equipo especializado, esto por algunos factores como el aumento de la temperatura durante la polimerización o el riesgo a la salud por la exposición los monómeros. Por último, el crecimiento de nanopartículas magnéticas presenta el proceso de fabricación de materiales mas complejo, ya que los procesos de síntesis de nanopartículas involucran la utilización de materiales y métodos mas costosos; en este caso reactivos químicos y equipo de laboratorio especializados, sumado a esto los conocimientos necesarios para la producción son complejos y no se transmiten tan fácilmente como en los otros dos procesos propuestos.

El crecimiento de nanopartículas metálicas presenta una gran ventaja en el desarrollo de materiales. Los costos y complejidad que presenta su fabricación lo posicionan como el

mas complejo de los materiales fabricados, pero por este mismo motivo es el que tiene el potencial de ser el de mayor valor agregado. La fabricación de materiales compuestos es la segunda en aumento de complejidad, y su proceso de producción le permite ser empleado en algunas actividades sin realizar muchos cambios a los procesos realizados. Los filtros fabricados con las muestras son el proceso mas simple y mas completo ya que presenta una aplicación probada. Si consideramos esta clasificación de complejidad es proporcional a la sustentabilidad de los procesos podemos obtener cual de ellos es mas sustentable.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo nos interesamos en buscar mecanismos que pudieran servir para emplear dos especies invasoras, el sargazo y el lirio acuático, que actualmente representan un problema, por los daños socio-ecológicos generados debido a su gran cantidad en los cuerpos de agua y costas de México, como materia prima para su consumo, transformación y aplicación sustentable como materiales con algún uso específico.

Como objetivo del trabajo se planteó estudiar las propiedades de residuos vegetales provenientes de sargazo y lirio acuático para luego, proponer y validar aplicaciones mediante la fabricación de filtros de separación de aceite en agua, materiales compuestos (polímero/especie invasora) y la especie invasora funcionalizada con nanopartículas magnéticas que permitan que el material responda a un campo magnético aplicado.

En una primera parte, vimos que la caracterización morfológica y estructural de ambas plantas arrojó resultados consistentes con los conocidos y ya reportados en la literatura. Esto sirvió como un punto de referencia ya que las dos especies que usamos como material prima no presentaban ninguna característica o propiedad atípica.

Los tres procesos de fabricación propuestos fueron validados exitosamente. Es decir, nuestra idea fue *transformar* nuestra materia prima mediante tres procesos diferentes para producir tres productos o materiales diferentes. Primeramente, se adaptó el método de coprecipitación química para la síntesis de nanopartículas de magnetita para realizarlo en presencia del sargazo o lirio acuático. Como mostró, fue posible realizar la reducción de nanopartículas magnéticas en la estructura fibrosa de las especies vegetales. En un segundo proceso, el sargazo y el lirio acuático fueron moldeados y posteriormente funcionalizados con barniz de poliestireno para formar filtros porosos hidrofóbicos para su uso en la separación de aceites del agua. La capacidad de absorción de estos filtros fue probada y su funcionamiento validado. Por último, las fibras recubiertas con el barniz fueron mezcladas con una resina de poliéster para fabricar un compuesto de la especie vegetal en la matriz de polimérica. En este vimos que el barniz y la propiedad hidrofóbica que éste induce en la superficie de las plantas, ayuda y favorece la adherencia entre la planta y el polímero. Final-

mente, el proceso de fabricación propuesto permite producir piezas de material compuesto de diferentes formas y tamaños según la disponibilidad de moldes.

En el esquema del trabajo planteado, estos procesos emplean y transforman la materia prima en un material diseñado para desarrollar una función específica. El análisis del alcance sustentable de estos materiales nos ha llevado a hacer un análisis crítico de las diferentes etapas empleadas para cada proceso buscando el balance entre costo-riesgo-beneficio. En este sentido y como ya se discutió, se consideró que la aplicación de la materia prima como filtros para separar aceite de agua resultaba la más interesante y prometedora en términos de poder ser considerada como sustentable. Esto debido al bajo requerimiento de energía, agua, materiales e infraestructura necesarios para su fabricación. Le sigue la fabricación de materiales compósitos, que requiere de más etapas, más materiales y su fabricación es más compleja, requiriendo de cierta infraestructura para llevarlo a cabo. Por último, la fabricación de las variedades magnéticas es sin duda la más compleja, la más cara y que requiere infraestructura y personal con especialización para llevarlo a cabo. Por otra parte, se debe notar que al analizar el potencial para sus aplicaciones y lo que podría pensarse como la explotación del producto, parecería que las especies magnéticas tienen mayor potencial para ser aplicadas en diversos escenarios. Los compósitos también pueden tener una variedad interesante de diferentes usos y por último, los filtros no poseen esa perspectiva de variedad de usos. Lo que lleva a una conclusión, al menos parcial, de que las medidas que pueden ponerse en juego para implementar procesos de fabricación que busquen o persigan alinearse con los principios de sustentabilidad pueden llevar a nuevos esquemas de fabricación y nuevos materiales que sean en mayor o menor medida sustentables.

6.1. Perspectivas

A partir de los estudios y resultados que hemos obtenido, las perspectivas de trabajos futuros se presentan a continuación:

Inicialmente se enfocaría a buscar nuevas formas que permitan transformar a las especies invasoras en materiales sustentables.

Un segundo punto sería el buscar alternativas en los materiales utilizados para aumentar la compatibilidad con el aceite y los plásticos, creando recubrimientos con materiales de origen animal o vegetal. Ejemplos de estos serían ceras, grasas, gomas de origen vegetal o animal renovables.

Una aproximación interesante sería la de estudiar otras opciones de materias primas que sean abundantes, baratas y renovables provenientes de otras fuentes. Estos podrían ser por ejemplo, residuos agroindustriales o residuos de alimentos.

Por último el establecer nuevos contactos y culminar las redes de colaboración para favorecer las innovaciones sociales que se plantearon durante el proyecto.

Apéndice A

Proceso del uso de los filtros

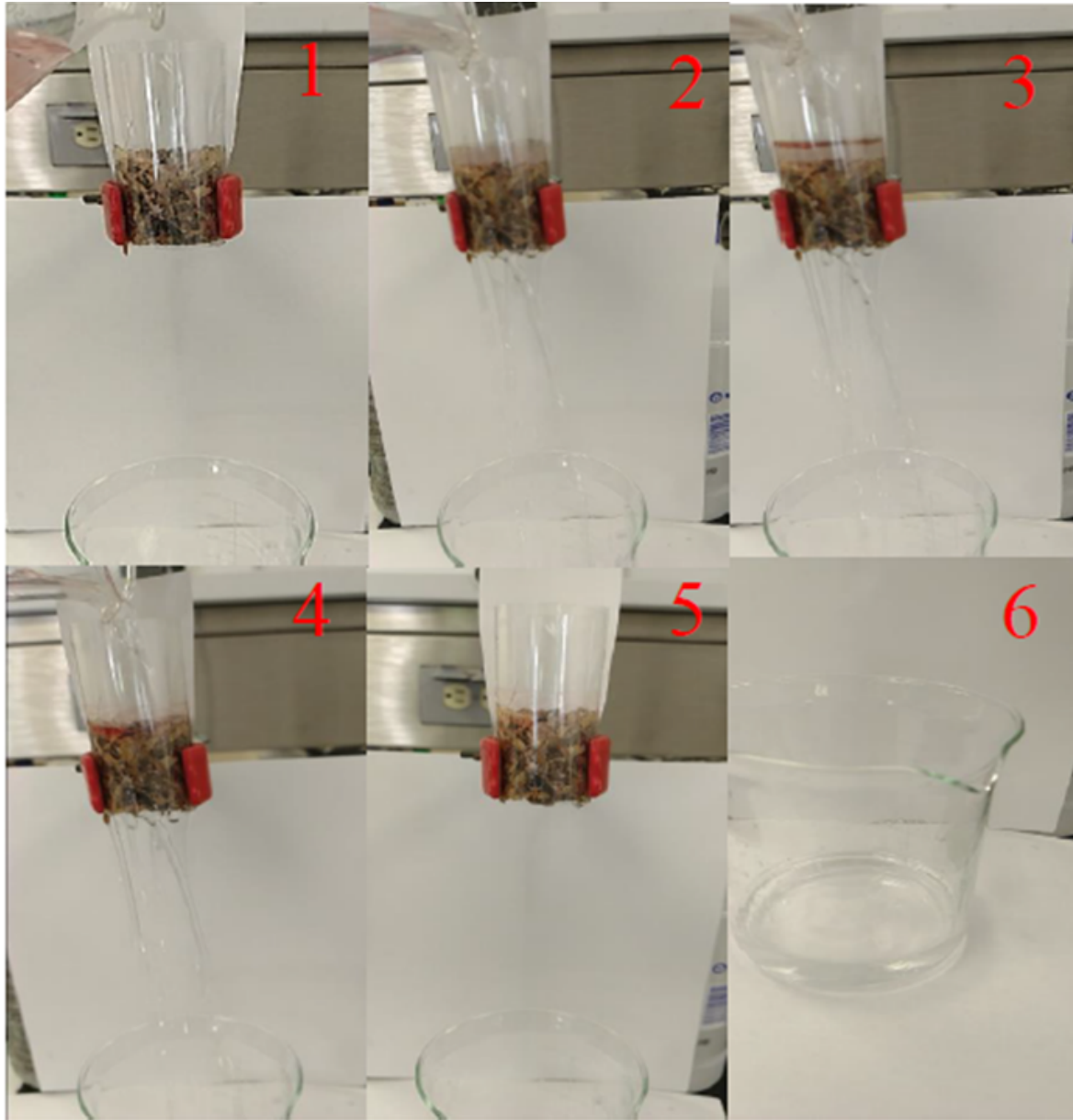


Figura A.1: Proceso de filtrado del lirio acuático

Apéndice B

Tablas de bandas relevantes de espectros infrarrojos

TABLE I
Infrared and Raman Spectra of Polystyrene and Vibrational Assignments

Infrared frequency, cm. ⁻¹	R.I.	Raman frequency, cm. ⁻¹	R.I.	Assignment
		152	1	
		196	2	$\nu_{8B}(B_1)$
216	w	218	2	$\nu_{10A}(B_2)$
325	vw			$\delta(\text{CCC})$
410	w			$\nu_{16A}(A_1)$
446	w			$\left\{ \begin{array}{l} \delta(\text{CCC}) \\ 2 \times \nu_{16B} = 434 \end{array} \right.$
540	s			$\nu_4(B_2)$
(560)		558	2	$\nu_{16A}(A_1)$
622	vw	621	4(d)	$\nu_{16B}(B_1)$
670	vvw			
700	vs			$\nu_{17}(B_2)$
		722	0	
		757	1	$\nu_4 + \nu_{16B} = 757$
760	vs			$\nu_{10B}(B_2)$
		791	0	
842	mw	833	0	$\nu_{10A}(A_1)$
906	m	908	1	$\nu_{17B}(B_2)$
945	vw	952	1	$\nu_4 + \nu_{16A} = 950$
965	w			$\nu_{17A}(A_2); \gamma_1(\text{CH}_2)?$
980	vw			$\left\{ \begin{array}{l} \nu_2(B_2) \\ \nu_{16B} + \nu_{16B} = 976 \end{array} \right.$
		999	10(p)}	$\left\{ \begin{array}{l} \nu_7(A_1) \\ \nu_{16}(A_1) \end{array} \right.$
1005	vw			
		1011	1	$\nu_{15}(A_1)$
1027	ms	1031	3(d)	$\nu_{16A}(A_1)$
		1058	0	$\nu_{16A} + \nu_{16B} = 1058$
1070	m			$\left\{ \begin{array}{l} \nu_{16B}(B_1) \\ \nu(\text{CC}) \end{array} \right.$
		1094	0	$\nu_4 + \nu_{16A} = 1098$
1110	vvw	1110	2	$\nu_{17} + \nu_{16A} = 1110$
1154	mw			$\nu_{16}(B_1)$
		1165	2	$\nu_{16B} + \nu_{16A} = 1170$
1180	mw	1177	1	$\nu_4 + \nu_{16B} = 1197$
1195	vvw	1200	4	$\nu_{16A}(A_1)$
1240	vw			$\nu_{16A} + \nu_{16A} = 1247$
		1269	0	
1310	w	1298	3(d)	$\nu_6(B_1)$
1328	w	1326	0	$\nu_{16}(B_1)$
1376	m			$\left\{ \begin{array}{l} \nu_6 + \nu_{16A} = 1390 \\ \delta(\text{CH})? \\ \delta(\text{CH}_2) \end{array} \right.$
1450	s	1449	1	$\nu_{15}(B_1)$
		1470	0	$\left\{ \begin{array}{l} \nu_{17} + \nu_{16B} = 1460; \nu_4 + \nu_{17B} = 1441 \end{array} \right.$
1493	s			$\nu_{16A}(A_1); \nu_4 + \nu_{17A} = 1505$
1543	vw			$\nu_{17} + \nu_{16A} = 1542$

Figura B.1: Tablas de picos de espectro infrarrojo del poliestireno

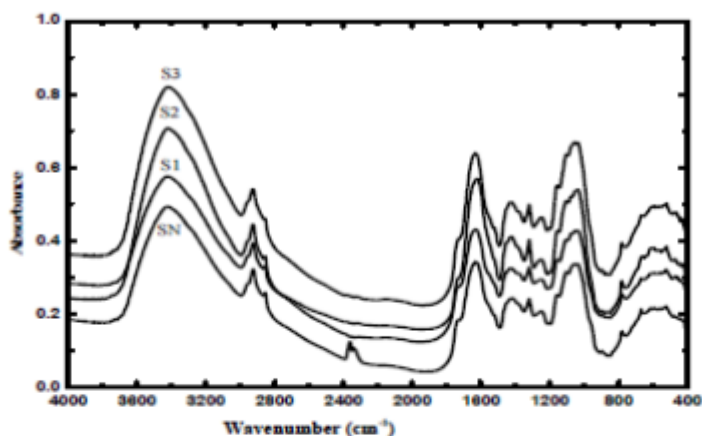


Fig. (2) FTIR absorbance spectra for water hyacinth shoot which collected from different media

Table 1. The band assignments of water hyacinth plant root and shoot

Shoot	Root	Band Assignment
3400-3366	3388	OH
2925-2854	2922-2852	CH
1732.7	1738.5	C=O
1645.9	1634.4	C=O
1624.7		C-O symm.,
1590.0		C-O asymm.,
	1516.7	C-O of CHO
1421.3	1422.2	C-O of cellulose
1384.6	1384.6	OH phenolic
1318.1	1371.1	CH
1035.6	1035.6	OH

Combining both results one can conclude that water hyacinth is a composite of cellulose/lignin/protein/metal oxides. Those could be representing the functional groups obtained by FTIR and the elemental analyses obtained by XRF. These data could furnish the basis for molecular modeling in order to simulate the structure of the plant as in the following section.

Table 2. The XRF concentrations of metals oxides as percentage; metal as ppm for water hyacinth plant root and shoot

	R/C	R1	R2	R3	SC	S1	S2	S3
SiO ₂	3.30	11.95	3.31	4.92	0.30	0.33	0.30	0.13
Fe ₂ O ₃	0.86	6.02	2.45	3.98	0.36	0.21	0.19	0.07
K ₂ O	1.31	4.02	2.40	2.40	2.28	5.30	3.81	4.01
Al ₂ O ₃	2.72	3.92	1.20	1.58	0.50	0.11	0.09	0.03
CaO	1.89	3.32	4.73	2.73	2.24	2.65	2.94	2.20
P ₂ O ₅	0.24	1.20	2.05	2.40	0.16	0.68	0.83	0.50
MgO	1.43	1.20	0.78	0.46	1.18	0.42	0.54	0.23
Ni ₂ O	-	1.14	1.40	0.67	-	0.12	0.70	1.38
SO ₂	0.65	0.99	2.05	2.71	0.46	0.18	0.34	0.49
MnO	0.16	0.71	1.11	0.48	0.03	0.05	0.16	0.03
TiO ₂	0.13	0.66	0.23	0.29	0.01	0.04	0.03	-
Zn	380	478	128	325	75	53	46	41
Ba	194	239	278	245	84	-	-	-
Se	112	262	344	194	118	116	181	95
Cu	36	185	162	159	20	116	215	-
Zr	33	120	65	58	10	16	34	15

Figura B.2: Tablas de picos de espectro infrarrojo del lirio acuático

Table.1 FT-IR absorption frequencies (cm^{-1}), intensity estimation and functional group of seaweeds *Sargassum wightii* and *Gracilaria corticata*.

Sargassum wightii		Gracilaria corticata		Functional Groups	Compound
Abs. Fre cm^{-1}	I.E	Abs. Fre cm^{-1}	I.E		
3371	S	3408	S	N-H Stretching	Polysaccharides
				O-H Stretching	Amino acids
2924	W	2924	W	N-H Stretching	Aliphatic
				CH_3 and CH_2 stretching	Compounds
2854	W	2854	W	C-H Symmetry stretching (aliphatic)	Aliphatic Compounds
2358, 2342	W	2365, 2344	W	C-O Stretching band, P-H stretching	Phosphine
1651, 1634, 1622	S	1662, 1653, 1645	S	C=O Stretching, N=O asymmetric Stretching (Nitrate)	Ester, Pectin
1558, 1539	W	1560	W	C=C Stretching	Lignin
1477, 1455	W	1457, 1430	W	C-O Stretching	Cutin
				O-H bending	
-	-	1374	W	S=O Stretching (Sulfonamides)	Lignin
1324	W	1326	W	S=O Stretching (sulfone)	Alkanes
1258	W	1246	W	C-C-O, S=O Stretching	Lignin
				C-O Stretching (phenols)	
-	-	1193	W	C-F Stretching	Cellulose
1058	M	1102	M	C-F Stretching	Cellulose, Carbohydrates
				Si-O	
1034	S	1034	M	S=O Stretching (sulfonides)	Starch and polysaccharides
877, 862, 820	W	876, 861, 824	W	Out of plane C-H bending	Glucose, Galactose
				Out of plane N-H Wagging	Fatty acids
668, 615	W	657, 617	W	C-S Stretching	Sulfates
606		606		C=S Stretching (sulfides)	
				Brominated and Iodo Components P-O Stretch	Phosphates
478, 415	W	467	W	S-S Stretching	Disulfides

I. E. - Intensity Estimation, S – Strong, M – Medium, W = Weak

Figura B.3: Tablas de picos de espectro infrarrojo del sargazo

Bibliografía

- [1] Maria Jose Gamez. Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Library Catalog: www.un.org.
- [2] J. Anggadiredja, Ria Andyani, and Hayati & Muawanah. Antioxidant activity of *Sargassum polycystum* (Phaeophyta) and *Laurencia obtusa* (Rhodophyta) from Seribu Islands. *Journal of Applied Phycology*, 9:477–479, 1997.
- [3] Laura Barsanti and Paolo Gualtieri. *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology, Second Edition*. CRC Press, 0 edition, March 2014.
- [4] A. Esmaili, S. Ghasemi, and J. Sohrabipour. Biosorption of copper from wastewater by activated carbon preparation from alga *sargassum* sp. *Natural Product Research*, 24(4):341–348, mar 2010.
- [5] Reeta Kumari, Inderdeep Kaur, and A. K. Bhatnagar. Enhancing soil health and productivity of *lycopersicon esculentum* mill. using *sargassum johnstonii* setchell & gardner as a soil conditioner and fertilizer. *Journal of Applied Phycology*, 25(4):1225–1235, nov 2012.
- [6] Ofer Raize, Yerachmiel Argaman, and Shmuel Yannai. Mechanisms of biosorption of different heavy metals by brown marine macroalgae. *Biotechnology and Bioengineering*, 87(4):451–458, 2004.
- [7] Lei Yang and J. Paul Chen. Biosorption of hexavalent chromium onto raw and chemically modified *sargassum* sp. *Bioresource Technology*, 99(2):297–307, jan 2008.
- [8] Marimuthu Thiripura Sundari and Atmakuru Ramesh. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from the aquatic weed water hyacinth—*Eichhornia crassipes*. *Carbohydrate Polymers*, 87(2):1701–1705, January 2012.
- [9] Shao-Wei Liao and Wen-Lian Chang. Heavy Metal Phytoremediation by Water Hyacinth at Constructed Wetlands in Taiwan. *J. Aquat. Plant Manage.*, page 9.
- [10] María Guadalupe Miranda A. and Antonio Lot H. El lirio aciático ¿una planta nativa de México? *del herbario*, 1999.
- [11] El-Wakil AM Abou El-Maaty. Removal of lead from aqueous solution on activated carbon and modified activated carbon prepared from dried water hyacinth plant. *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 5(2), 2014.

- [12] Shesh Nath and Keshav Singh. Analysis of different nutrient status of liquid bio-fertilizer of different combinations of buffalo dung with gram bran and water hyacinth through vermicomposting by *eisenia fetida*. *Environment, Development and Sustainability*, 18(3):645–656, may 2015.
- [13] Chisato Takahashi, Takashi Shirai, and Masayoshi Fuji. FE-SEM observation of swelled seaweed using hydrophilic ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate. *Microscopy Research and Technique*, 76(1):66–71, oct 2012.
- [14] Karri Satyanagalakshmi, Raveendran Sindhu, Parameswaran Binod, Kanakambaran Usha Janu, and Ashok Pandey. Bioethanol production from acid pretreated water hyacinth by separate hydrolysis and fermentation. page 7.
- [15] Robert T. Conley. IR—theory and practice of infrared spectroscopy (szymanski, herman a. alpert, nelson l.). *Journal of Chemical Education*, 42(4):A316, apr 1965.
- [16] Chen Hong Hak, Kah Hon Leong, Yik Heng Chin, Pichiah Saravanan, Sin Tee Tan, Woon Chan Chong, and Lan Ching Sim. Water hyacinth derived carbon quantum dots and g-c₃n₄ composites for sunlight driven photodegradation of 2,4-dichlorophenol. *SN Applied Sciences*, 2(6), may 2020.
- [17] Ganning Zeng, Chunxian Hong, Yan Zhang, Hanzhang You, Wenyue Shi, Mingming Du, Ning Ai, and Bing Chen. Adsorptive removal of cr(VI) by sargassum horneri-based activated carbon coated with chitosan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(2), feb 2020.
- [18] Kiplangat Rop, Damaris Mbui, George N. Karuku, Immaculate Michira, and Njagi Njomo. Characterization of water hyacinth cellulose-g-poly(ammonium acrylate-co-acrylic acid)/nano-hydroxyapatite polymer hydrogel composite for potential agricultural application. *Results in Chemistry*, 2:100020, jan 2020.
- [19] T.M. Thompson, B.R. Young, and S. Baroutian. Pelagic sargassum for energy and fertilizer production in the caribbean: A case study on barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118:109564, feb 2020.
- [20] A. Sittinun, P. Pisitsak, and S. Ummartyotin. Improving the oil sorption capability of porous polyurethane composites by the incorporation of cellulose fibers extracted from water hyacinth. *Composites Communications*, 20:100351, aug 2020.
- [21] Abdelrahman M. Rabie, Mostafa R. Abukhadra, Ahmed M. Rady, Sayed A. Ahmed, Ahmed Labena, Hussein S. H. Mohamed, Mohamed A. Betiha, and Jae-Jin Shim. Instantaneous photocatalytic degradation of malachite green dye under visible light using novel green co-ZnO/algae composites. *Research on Chemical Intermediates*, 46(3):1955–1973, jan 2020.
- [22] Jeessica Hermayanti Pratama, Amalia Amalia, Rizka Lailatul Rohmah, and Teguh Endah Saraswati. The extraction of cellulose powder of water hyacinth (*eichhornia crassipes*) as reinforcing agents in bioplastic. In *3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDENSED MATTER AND APPLIED PHYSICS (ICC-2019)*. AIP Publishing, 2020.

- [23] Dongyang Sun, Amaka J. Onyianta, Dominic O'Rourke, Guilhem Perrin, Carmen-Mihaela Popescu, Lip Huat Saw, Zuansi Cai, and Mark Dorris. A process for deriving high quality cellulose nanofibrils from water hyacinth invasive species. *Cellulose*, 27(7):3727–3740, feb 2020.
- [24] Akeem Mohammed, Arianne Rivers, David. C. Stuckey, and Keeran Ward. Alginate extraction from sargassum seaweed in the caribbean region: Optimization using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 245:116419, oct 2020.
- [25] Akeem Mohammed, Arianne Rivers, David.C. Stuckey, and Keeran Ward. Datasets on the optimization of alginate extraction from sargassum biomass using response surface methodology. *Data in Brief*, 31:105837, aug 2020.
- [26] Santhana Krishnan, Mohamad Faizal Ahmad, Nur Azmira Zainuddin, Mohd. Fadhil Md. Din, Shahabaldin Rezanía, Shreeshivadasan Chelliapan, Shazwin Mat Taib, Mohd Nasrullah, and Zularisam Abdul Wahid. Bioethanol production from lignocellulosic biomass (water hyacinth): a biofuel alternative. In *Bioreactors*, pages 123–143. Elsevier, 2020.
- [27] Anuja Sharma and Neeraj K. Aggarwal. *Water Hyacinth: A Potential Lignocellulosic Biomass for Bioethanol*. Springer International Publishing, 2020.
- [28] Heba Ali. Isolation of different clostridium isolates for acetone-butanol-ethanol (ABE) production from sargassum sp. *Egyptian Journal of Chemistry*, 0(0):0–0, apr 2020.
- [29] Shao-Wei Liao and Wen-Lian Chang. Heavy metal phytoremediation by water hyacinth at constructed wetlands in taiwan. *J. Aquat PLant Manage.*, 42:60–68, 2004.
- [30] Michael F. Ashby. Background. In *Materials and Sustainable Development*, pages 1–25. Elsevier, 2016.
- [31] Karel Mulder, Didac Ferrer, and Harro Van Lente. *What is sustainable technology?: Perceptions, paradoxes and possibilities*. Routledge, 2017.
- [32] What is a circular economy? | ellen MacArthur foundation. Library Catalog: www.ellenmacarthurfoundation.org.
- [33] La agenda 2030 para el desarrollo sostenible en el nuevo contexto mundial y regional. escenarios y proyecciones en la presente crisis. page 68.
- [34] Anna Cossetta and Mauro Palumbo. The co-production of social innovation social innovation : The case of living lab living lab. In *Smart City*, pages 221–235. Springer International Publishing, 2014.
- [35] Zhongxin Xue, Yingze Cao, Na Liu, Lin Feng, and Lei Jiang. Special wettable materials for oil/water separation. *J. Mater. Chem. A*, 2(8):2445–2460, 2014.
- [36] Puangrat Kajitvichyanukul, Yung-Tse Hung, and Lawrence K. Wang. *Oil Water Separation*, pages 521–548. Humana Press, Totowa, NJ, 2006.

- [37] William E. Smith and Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 2004.
- [38] M.A. Dweib, B. Hu, H.W. Shenton, and R.P. Wool. Bio-based composite roof structure: Manufacturing and processing issues. *Composite Structures*, 74(4):379–388, aug 2006.
- [39] Amar K Mohanty, Manjusri Misra, and Lawrence T. Drzal, editors. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Taylor & Francis, 2005.
- [40] Seth C. Rasmussen. Revisiting the early history of synthetic polymers: Critiques and new insights. *Ambix*, 65(4):356–372, 2018. PMID: 30139312.
- [41] Jhon Scherirs and Timothy E. Long, editors. *Modern polyesters: chemistry and technology of polyesters and copolyesters*. Jhon Wiley & Sons, Ltd., 2003.
- [42] Johannes Karl Fink. Unsaturated polyester resins. In *Reactive Polymers Fundamentals and Applications*, pages 1–48. Elsevier, 2013.
- [43] C. Y. Liang and S. Krimm. Infrared spectra of high polymers. VI. polystyrene. *Journal of Polymer Science*, 27(115):241–254.
- [44] Tais A. P. F. Pimentel, Jussara A. Durães, Adriana L. Drummond, Daniela Schlemmer, Rosana Falcão, and Maria José Araújo Sales. Preparation and characterization of blends of recycled polystyrene with cassava starch. *Journal of Materials Science*, 42(17):7530–7536, may 2007.
- [45] John Simonsen and Timothy G. Rials. Morphology and properties of wood-fiber reinforced blends of recycled polystyrene and polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 9(3):292–302, jul 1996.
- [46] Reciclado de EPS-poliestireno reciclado|reciclaje de poliestireno.
- [47] Zhichao Lou, He Han, Ming Zhou, Jingquan Han, Jiabin Cai, Caoxing Huang, Jing Zou, Xiaoyan Zhou, Hongjie Zhou, and Zhaobin Sun. Synthesis of magnetic wood with excellent and tunable electromagnetic wave-absorbing properties by a facile vacuum/pressure impregnation method. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1):1000–1008, dec 2017.
- [48] Ricardo J.B. Pinto, Paula A.A.P. Marques, Manuel A. Martins, Carlos Pascoal Neto, and Tito Trindade. Electrostatic assembly and growth of gold nanoparticles in cellulosic fibres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 312(2):506–512, aug 2007.
- [49] Valentina Ramírez Hernández and Jaime Antero Arango. Evolución de las teorías de explotación de recursos naturales: hacia la creación de una nueva ética mundial. *Luna Azul*, (39):291–313, jun 2014.
- [50] James D. Mauseth. *Botany: An introduction to Plant Biology*. Jones & Bartlett Learning, 2017.

- [51] Shibu Jose and Harminder pal Singh Daizy Rani Batish Ravinder Kumar Kholi, editors. *Invasive Plant Ecology*. CRC Press, 2013.
- [52] Shibu Jose and Harminder pal Singh Daizy Rani Batish Ravinder Kumar Kholi, editors. *Invasive Plants and forest ecosystem*. CRC Press, 2009.
- [53] Secretaría de turismo | qroo.gob.mx.
- [54] En playa del carmen, 'cristóbal' arrastra 500 toneladas de sargazo.
- [55] 26 de Junio de 2019. Sargazo en méxico: el contacto con el alga provoca efectos nocivos en la salud humana. Library Catalog: www.infobae.com.
- [56] Lydiane Mattio and Claude E. Payri. 190 years of sargassum taxonomy, facing the advent of DNA phylogenies. *The Botanical Review*, 77(1):31–70, sep 2010.
- [57] Naomi Phillips and Suzanne Fredericq. Biogeographic and phylogenetic investigations of the pantropical genus sargassum (fucales, phaetophyceae) with respect to gulf of mexico species. *Gulf of Mexico Science*, 18(2), jan 2000.
- [58] Maria Hayes, editor. *Marine bioactive compounds: sources, characterization and applications*. Springer, New York, 2012. OCLC: ocn781991786.
- [59] Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Gustavo Hernández-Carmona, Yoloxochitl Elizabeth Rodríguez-Montesinos, Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Dora Luz Arvizu-Higuera, Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Raúl Reyes-Tisnado, Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de la Paz, Jesús Iván Murillo-Álvarez, Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Mauricio Muñoz-Ochoa, and Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Avances tecnológicos en la producción de alginatos en México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(2):155–168, April 2012.
- [60] Zaki Kuruppallil. GREEN PLASTICS: AN EMERGING ALTERNATIVE FOR PETROLEUM-BASED PLASTICS? *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH*, (1):6, 2011.
- [61] M. Nizar Machmud, Reza Fahmi, Rohana Abdullah, and Coco Kokarkin. Characteristics of Red Algae Bioplastics/Latex Blends under Tension. *International Journal of Science and Engineering*, 5(2), October 2013.
- [62] N Rajendran. Seaweeds can be a new source for bioplastics. *Journal of Pharmacy Research*, (3):4, 2012.
- [63] E S Stevens. WHAT MAKES GREEN PLASTICS GREEN? page 4, 2003.
- [64] José Angel Aguilar, Ovidio M. Camarena, Ted D. Center, and Germán Bojórquez. Biological control of waterhyacinth in sinaloa,mexico with the weevil neochetina eichhorniae and n. bruchi. *Biocontrol*, 48:595–608, 2003.

- [65] Abera Hailu and Emana Degaga. Water hyacinth (*eichhornia crassipes*) biology and its impacts on ecosystem, biodiversity, economy and human well-being. 03 2019.
- [66] Antonio Lot Helgueras, Alejandro Novelo, and Pedro Ramirez García. Listados florísticos de México. 5:1–60, 1986.
- [67] Abera Hailu Degaga. Water hyacinth (*eichhornia crassipes*) biology and its impacts on ecosystem, biodiversity, economy and human well-being. *Journal of Natural Sciences Research*, 2019.
- [68] Elton N. Kaufmann, editor. *Characterization of Materials*. John Wiley & Sons, Inc., oct 2002.
- [69] Rafael Ferraz Cella, Guilherme Davi Mumbach, Karina Luzia Andrade, Patricia Oliveira, Cintia Marangoni, Ariovaldo Bolzan, Samuel Bernard, and Ricardo Antonio Francisco Machado. Polystyrene recycling processes by dissolution in ethyl acetate. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(18):46208, jan 2018.
- [70] OMAR FERNANDO DE LEÓN IBARRA. Reciclaje de unicele para la funcionalización de esponjas de coco hidrofóbicas de bajo costo para la remoción de aceites en agua, 2019.
- [71] Imtiaz Ali and Ali Bahadar. Red Sea seaweed (*Sargassum* spp.) pyrolysis and its devolatilization kinetics. *Algal Research*, 21:89–97, January 2017.
- [72] Guang'en Luo, P. James Strong, Hailong Wang, Wuzhong Ni, and Weiyong Shi. Kinetics of the pyrolytic and hydrothermal decomposition of water hyacinth. *Bioresource Technology*, 102(13):6990–6994, July 2011.
- [73] Yan Cao, Huiquan Li, Yi Zhang, Jun Zhang, and Jiasong He. Structure and properties of novel regenerated cellulose films prepared from cornhusk cellulose in room temperature ionic liquids. 116(1):547–554.
- [74] Xiaohui Ju, Mark Bowden, Elvie E. Brown, and Xiao Zhang. An improved x-ray diffraction method for cellulose crystallinity measurement. *Carbohydrate Polymers*, 123:476–481, jun 2015.
- [75] JunFei Fang, YiMin Xuan, and Qiang Li. Preparation of polystyrene spheres in different particle sizes and assembly of the PS colloidal crystals. *Science China Technological Sciences*, 53(11):3088–3093, November 2010.
- [76] S Kannan. FT-IR and EDS analysis of the seaweeds *Sargassum wightii* (brown algae) and *Gracilaria corticata* (red algae). page 11, 2014.