



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO MEXICANO PARA LA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA**



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO Y EL RENDIMIENTO DE  
CELULOSA EN UN PROCESO DE EXTRACCIÓN ALCALINA A PARTIR DE  
*SARGASSUM SPP.*”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

PRESENTA

ING. GILBERTO ANGEL MELÉNDEZ GARCÍA

DIRECTORAS DE TESIS

DRA. SANDRA SOLEDAD MORALES GARCÍA

DRA. DIANA PALMA RAMÍREZ

Ciudad de México, 16 de Enero del 2026



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13 BIS  
REP 2017

### ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a 14 de octubre del 2025

El Colegio de Profesores de Posgrado del Centro Mexicano para la Producción más Limpia en su Sesión

(Unidad Académica)

ordinaria No. 9 celebrada el día 30 del mes de septiembre del 2025, conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Meléndez	Apellido Materno:	García	Nombre (s):	Gilberto Ángel
-------------------	----------	-------------------	--------	-------------	----------------

Número de registro: A 2 4 0 6 9 7

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia

Referente al registro de su tema de tesis, acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

"Evaluación de la reducción de arsénico y el rendimiento de celulosa en un proceso de extracción alcalina a partir de *Sargassum spp.*"

Objetivo general del trabajo de tesis:

Evaluar la reducción de arsénico y el rendimiento de celulosa en un proceso de extracción alcalina a partir de *Sargassum spp.*

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Directora: Dra. Sandra Soledad Morales García 2° Directora: Dra. Diana Palma Ramírez

No aplica

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

Centro Mexicano para la Producción más Limpia

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora Correspondiente

Director(a) de Tesis

Dra. Sandra Soledad Morales García

Aspirante

Gilberto Ángel Meléndez García

2° Director de Tesis (en curso)

Dra. Diana Palma Ramírez

Presidente del Colegio

Dr. Raúl Hernández Altamirano



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14  
REP 2017

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México siendo las 10:00 horas del día 16 del mes de enero del 2026 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores del Posgrado del Centro Mexicano para la Producción más Limpia para examinar la tesis titulada:

Evaluación de la reducción de arsénico y rendimiento de celulosa en un proceso de extracción alcalina a partir de *Sargassum spp.*

Apellido Paterno:	Meléndez	Apellido Materno:	García	Nombre (s):	Gilberto Angel
-------------------	----------	-------------------	--------	-------------	----------------

Número de registro: A 2 4 0 6 9 7

Alumno del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 03 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI  NO  SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

**JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:**

Los directores de tesis dan su aval de que el trabajo de tesis desarrollado por el estudiante cumple con el criterio de originalidad establecido en el Artículo 33 fracciones I y II del Reglamento de Estudios de Posgrado del Instituto Politécnico Nacional vigente..

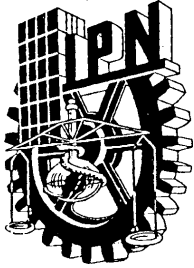
**--Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:

Porque es una investigación original que aporta información relevante que contribuye a la mitigación de impacto del sargazo en las costas del Caribe Mexicano, al valorizar la macroalga.

**COMISIÓN REVISORA DE TESIS**

 Director de Tesis Dra. Sandra Soledad Morales García	 2 <sup>a</sup> Director de Tesis Dra. Diana Palma Ramírez	 Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto
 Mtra. Elisa Arreola Valerio	 Dr. Eidel Alejandro Aguilar Aguilar	 Dr. Raúl Hernández Altamirano <b>PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES</b>



# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

## **SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

### **CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN**

En la Ciudad de México el día 05 del mes de enero del año 2026, la que suscribe Gilberto Angel Meléndez García alumno del Programa de Posgrado: Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia con número de registro A240697, adscrito al Centro Mexicano para la Producción más Limpia, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Sandra Soledad Morales García y la Dra. Diana Palma Ramírez cede los derechos del trabajo titulado "Evaluación de la reducción de arsénico y rendimiento de celulosa en un proceso de extracción alcalina a partir de *Sargassum spp.*", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: [smoralesg@ipn.mx](mailto:smoralesg@ipn.mx), [dpalmar@ipn.mx](mailto:dpalmar@ipn.mx) y [gmelendezgikp@gmail.com](mailto:gmelendezgikp@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



---

Gilberto Angel Meléndez García

## **Agradecimientos**

Mediante el presente trabajo agradezco al Instituto Politécnico Nacional, mi alma máter, por la oportunidad de continuar mi formación profesional, junto con el Centro Mexicano para la Producción más Limpia (CMP+L) donde se me permitió desarrollar el presente trabajo para la obtención de mi grado de maestría. También agradezco a la Beca Institucional y la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI) que me fueron concedidas.

Como parte fundamental este trabajo se sustentó mediante el Proyecto de Innovación Institucional SIP-20232768 Y SIP-2024-1073 “Remoción de metales pesados en subproductos del sargazo: Análisis de factibilidad de obtención de celulosa cristalina libre de arsénico.

Agradezco a mis directoras, la Dra. Sandra Soledad Morales García y la Dra. Diana Palma Ramírez por su dirección, apoyo y paciencia durante el desarrollo de este proyecto. Así mismo a mi comité tutorial integrado por el Dr. Fabian Mederos Nieto y la Mtra. Elisa Arreola Valerio por su retroalimentación y, particularmente, al Dr. Fidel Alejandro Aguilar Aguilar por su enseñanza, guía, apoyo y acompañamiento en la experimentación y análisis de los resultados.

Al Laboratorio Ambiental del CMP+L donde se realizó a experimentación principal de este trabajo y junto al Laboratorio Nacional para el Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LaNDACBio) del CMP+L por la infraestructura y asistencia técnica para la realización de los análisis de caracterización fisicoquímica.

Agradezco a Dios principalmente que me permite tener las capacidades y posibilidades de desarrollar mi vida profesional, siendo mis padres y esposa los principales animadores. A mi madre por la inspiración, fortaleza y apoyo en todos sentidos en este posgrado, a mi padre por el aliento y a mi esposa por su confianza, admiración, apoyo, aliento, ánimo y servicio durante todo este periodo. A mi tío Javier y familia por darme su apoyo económico y moral para lograr la culminación de mis estudios ya que, de no ser así, esto no sería posible. A mis amigos y compañeros que me enseñaron tanto y acompañaron en los momentos más crítico, desalentadores y preocupantes, transformándolos en aprendizaje profundo y efectivo, además de grandes memorias para la posteridad.

## Resumen

El *Sargassum spp* conocido como sargazo, que llega a las costas del Caribe Mexicano en forma de arribazones masivos, provoca problemáticas ambientales significativas provocadas por la descomposición de la macroalga en la arena de la línea de playa, como son la emisión de gases de ácido sulfhídrico y de efecto invernadero, así como la generación de lixiviados con metaloides pesados como el arsénico, del cual se ha documentado que su presencia es consistente y elevada, llegando hasta concentraciones de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para proponer una valorización de esta macroalga y coadyuvar a reducir su impacto, en el presente estudio se evaluó la reducción de arsénico y el rendimiento de la celulosa a partir del *Sargassum spp*. con un proceso de extracción alcalina empleando hidróxido de sodio (NaOH) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) mediante un análisis por superficie de respuesta con factores y 3 niveles respecto a la variación de la concentración de NaOH,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , tiempo y temperatura. Para lo cual se hicieron caracterizaciones del sargazo por medio de técnicas y análisis de FT-IR, TGA, DRX, ICP-OES, COT, elemental, extraíbles, STF y STV; y FT-IR, TGA, DRX e ICP-OES de las celulosas obtenidas del diseño experimental tipo Box-Behnken con 27 corridas. Al finalizar la experimentación y caracterización se realizó el análisis por superficie de respuesta utilizando el software de STATISTICA para encontrar los factores significativos para obtener el mayor rendimiento de celulosa en porcentaje (%) con la menor concentración de arsénico en  $\text{mg kg}^{-1}$ ; el cual dio como resultado que las condiciones óptimas de proceso dependen con una correlación lineal positiva del NaOH y el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , además de una correlación lineal negativa de la temperatura con hidróxido de sodio, siendo las condiciones óptimas de NaOH al 7%,  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 19% a  $30^\circ \text{ C}$  por 300 min o  $50^\circ \text{ C}$  por 120 min que dan un 42% de rendimiento con 40% de celulosa y  $4.36 \text{ mg/ kg}$  de arsénico total.

## Abstract

*Sargassum spp.*, known as sargassum, which arrives on the shores of the Mexican Caribbean in the form of massive strandings, causes significant environmental problems due to the decomposition of the macroalgae in the sand along the beach, such as the emission of hydrogen sulfide and greenhouse gases, as well as the generation of leachates with heavy metalloids such as arsenic, whose presence has been documented as consistent and high, exceeding  $80 \text{ mg kg}^{-1}$ . To propose a valorization of this macroalgae and help reduce its impact, this study evaluated the reduction of arsenic and the yield of cellulose from *Sargassum spp.* using an alkaline extraction process with sodium hydroxide (NaOH) and hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) through a response surface analysis with factors and three levels regarding the variation in the concentration of NaOH,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , time, and temperature. For this purpose, the sargassum was characterized using FT-IR, TGA, XRD, ICP-OES, TOC, elemental, extractables, STF, and STV techniques and analyses; and FT-IR, TGA, XRD, and ICP-OES of the cellulose obtained from the Box-Behnken experimental design with 27 runs. At the end of the experimentation and characterization, response surface analysis was performed using STATISTICA software to find the significant factors for obtaining the highest cellulose yield in percentage (%) with the lowest arsenic concentration in  $\text{mg kg}^{-1}$ ; this resulted in the optimal process conditions depending on a positive linear correlation between NaOH and  $\text{H}_2\text{O}_2$ , as well as a negative linear correlation between temperature and sodium hydroxide, with the optimal conditions being 7% NaOH,  $\text{H}_2\text{O}_2$  at 19% at  $30^\circ\text{C}$  for 300 min or  $50^\circ\text{C}$  for 120 min, which give a 42% yield with 40% cellulose and  $4.36 \text{ mg/kg}$  of total arsenic.

# Contenido

<i>Lista de tablas</i> .....	11
<i>Lista de Figuras</i> .....	12
<b>Capítulo I</b> .....	14
<b>Introducción</b> .....	14
Planteamiento del Problema.....	17
Justificación .....	23
Hipótesis .....	26
Objetivos.....	26
Línea del conocimiento de la investigación .....	27
Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....	27
<b>Capítulo II</b> .....	28
<b>Marco teórico</b> .....	28
Algas .....	28
Sargazo.....	30
Impacto ambiental del sargazo.....	33
Lignina .....	33
Celulosa.....	34
Procesos de extracción de celulosa .....	35
Arsénico: propiedades, efectos ambientales y a la salud.....	38
Arsénico y sargazo.....	39
<b>Estado del arte</b> .....	41
<b>Antecedentes</b> .....	44
<b>Capítulo III</b> .....	45
<b>Metodología</b> .....	45
Metodología de la investigación .....	45
Metodología de experimentación.....	45
Obtención y preparación del material .....	47
Pretratamiento .....	48
Extracción y cuantificación de extraíbles.....	48
Caracterización fisicoquímica.....	49

Carbón Orgánico Total (COT) .....	49
Sólidos Totales Fijos y Sólidos Fijos Volátiles .....	50
Composición elemental (CHONS).....	51
Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR).....	51
Análisis Termo Gravimétrico (TGA).....	52
Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).....	52
Difracción de Rayos X (DRX).....	52
Diseño de experimentos .....	53
<b>Montaje experimental .....</b>	<b>55</b>
Extracción de celulosa.....	55
Purificación .....	55
Caracterizaciones y análisis de celulosa.....	56
<b>Capítulo IV .....</b>	<b>59</b>
<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>59</b>
<b>Caracterización fisicoquímica .....</b>	<b>59</b>
Extraíbles en el sargazo.....	61
Evaluación estructural de la materia prima mediante FT-IR.....	62
Análisis de la estabilidad térmica del sargazo.....	64
Difracción de Rayos X (DRX).....	66
<b>Resultados de pretratamiento.....</b>	<b>67</b>
<b>Resultados obtención de celulosa .....</b>	<b>67</b>
<b>Resultados de caracterización de la celulosa obtenida .....</b>	<b>68</b>
FT-IR.....	70
TGA .....	71
DRX.....	74
Determinación de Arsénico por Espectroscopía de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).....	78
<b>Análisis por superficie de respuesta.....</b>	<b>80</b>
Celulosa.....	80
Arsénico .....	85
<b>Conclusiones.....</b>	<b>90</b>
<b>Recomendaciones a futuro .....</b>	<b>91</b>

*Referencias* ..... 92

*Cronograma de actividades* ..... 102

## Lista de tablas

Tabla 1 Recopilación de cantidades totales retiradas por año de sargazo de las costas del estado de Quintana Roo. Elaboración propia.....	23
Tabla 2 Concentración de oligoelementos (mg kg <sup>-1</sup> , dw) en especies y morfotipos de sargazo bentónicos y pelágicos en el Océano Atlántico reportados en otros estudios. Rango y/o media (±DE). Ortega Flores, 2022 .....	25
Tabla 3 Comparativa de estudios diversos del Sargassum. Spp. Elaboración propia.....	32
Tabla 4 Factores y niveles del diseño experimental. ....	53
Tabla 5 Combinaciones para el proceso de extracción con base al diseño experimental. ....	54
Tabla 6 Caracterización fisicoquímica del sargazo crudo. Elaboración propia,2025.....	60
Tabla 7 Porcentaje de extraíbles del sargazo con base a NREL/TP-510-42619.....	61
Tabla 8 Asignación de grupos funcionales del Sargazo en espectro FTIR. Elaboración propia ..	63
Tabla 9 Rendimientos por corrida. Elaboración propia,2025.....	68
Tabla 10 Asignación de bandas en muestras C4, C6, C21 y celulosa microstalina estándar. Elaboración propia, 2025.....	71
Tabla 11 Comparación de porcentajes de rendimiento de la extracción con su aproximación de celulosa pura en las muestras. Elaboración propia, 2025. ....	73
Tabla 12 índice cristalino de Segal de los productos de la extracción respecto al ángulo 2θ. Elaboración propia,2025.....	77
Tabla 13 Concentraciones de arsénico residual del proceso alcalino. ND= No Detectado. Elaboración propia, 2025.....	79

# Lista de Figuras

Figura 1 Mapa del Atlántico con el mar y nuevo mar de sargazos. IEM, 2024 .....	17
Figura 2 Histórico de arribo 2018-2024. IOG,2024 .....	18
Figura 3 Boletín I.O.G.M.C. NÚM. 1248, 2025.....	19
Figura 4 Árbol de problema de la investigación. Elaboración propia, 2025 .....	22
Figura 5 ODS. OMS,2024 .....	27
Figura 6 El Sargassum. Imagen Héctor Ruiz, (EcoExploratorio, 2024).....	30
Figura 7 Esquema de estructura. (Vallejos, 2024).....	34
Figura 8 Mapa de flujo de metodología. Elaboración propia. ....	45
Figura 9 Mapa de flujo general de la experimentación. Elaboración propia, 2025. ....	46
Figura 10 Mapa de sitio de muestreo. Google Maps,2025 .....	47
Figura 11 Mapa de muestreo y limpieza del sargazo. Elaboración propia, 2025. ....	47
Figura 12 Diagrama de flujo del proceso general de extracción de celulosa a partir de Sargassum spp. ND= No Detectado. Elaboración propia, 2025. ....	58
Figura 13 Espectro FTIR representativo de la materia prima, Sargazo. ....	62
Figura 14 Termograma TGA y DTG de Sargazo crudo. Elaboración propia,2025.....	64
Figura 15 Difractograma de Sargazo crudo. Elaboración propia, 2025. ....	66
Figura 16 Muestras de producto de la reacción, corridas 1 a 27. Elaboración propia, 2025. ....	69
Figura 17 Espectros FT-IR de celulosa grado reactivo, corridas 4, 6 y 21. Elaboración propia, 2025. ....	71
Figura 18 Termograma de productos de la extracción. a) TGA (izquierda), b) DTG (derecha). Elaboración propia, 2025. ....	72
Figura 19 Comparación de grupos de patrones de DRX de productos de la extracción. a) NaOH al 7%, b) NaOH al 18.5%, c) NaOH al 30% y c) Máximos vs mínimo vs sargazo. Elaboración propia, 2025.....	75
Figura 20 Diagrama de Pareto respecto al rendimiento de reacción del proceso de extracción de celulosa. Elaboración propia, 2025.....	80
Figura 21 Gráficas de contorno sobre análisis del rendimiento de la reacción en porcentaje respecto a la influencia de los factores. a) Temperatura vs Tiempo, b) Tiempo y concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , c)	

Concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> vs temperatura, d) Concentración de NaOH vs H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , e) Temperatura vs concentración de NaOH, f) Tiempo vs concentración de NaOH. Elaboración propia, 2025 .....	84
Figura 22 Diagrama de Pareto respecto a la concentración de arsénico en la celulosa obtenida. Elaboración propia, 2025.....	85
Figura 23 Gráficas de contorno respecto al arsénico residual de la celulosa obtenida. Elaboración propia, 2025. ....	87
Figura 24 Gráfica de columnas agrupadas de concentración de arsénico residual y rendimiento de celulosa por corrida. Elaboración propia, 2025. ....	88

# Capítulo I

## Introducción

Los procesos de transformación permiten el aprovechamiento de los recursos naturales al ser humano para su conservación, desarrollo y crecimiento, ya que permiten satisfacer las necesidades básicas y emergentes del hombre. Sin embargo, debido a la sobre explotación de los recursos renovables y no renovables, ha provocado una nueva urgente necesidad de encontrar fuentes alternativas o altamente eficientes que satisfagan las necesidades humanas con un menor impacto ambiental y/o generando un impacto positivo con las mismas o mejores propiedades de los productos extraídos sin comprometer sus ciclos y procesos de regeneración, siendo estos estos no menores a su velocidad y capacidad de aprovechamiento. Un ejemplo clave es la deforestación por la tala excesiva para obtención de celulosa para la industria de papel; por lo que se desarrollaron diversos métodos y procesos que permitieran extraer este compuesto de otros recursos lignocelulósicos que pudieran regenerarse al mismo tiempo o más rápido que demanda de sus productos derivados y al igual que más económico procesarlo.

Estudios han reportado que las macroalgas tienen un alto contenido de polisacáridos, en particular las paredes celulares de las especies pardas del género *Phaeophyceae* (algas marrones o pardas) que son ricas en polisacáridos biodegradables como celulosa, alginatos, fucoïdan, laminarina y manitol. Se estima que el porcentaje de carbohidratos de estas especies se encuentre entre 39 y 58 %, aunque con un bajo contenido de proteína cruda de aproximadamente 8%, pero conteniendo minerales y compuestos vitamínicos como retinol y ácido ascórbico en concentraciones de 821.50 y 46.50 mg por 100 g de *Sargassum*, respectivamente. Debido a la importancia de esos compuestos por sus aplicaciones actuales y potenciales, el gobierno mexicano incorporó como recurso pesquero al sargazo que todavía se encuentra en condiciones holopelágicas en agosto del año 2025, actualizando la Carta Nacional Pesquera en el DOF 06/08/2025 ; además como residuo de manejo especial, ya que se han documentado arribazones masivos de sargazo desde 2011 y que han aumentado progresivamente hasta la fecha llegando a las 86,000 toneladas de *Sargassum spp* en 2025, que al depositarse en la playa se mezcla con la arena, provocando la erosión de las playas por su disposición; además de la absorción y adsorción de metales pesados.

Las aplicaciones del aprovechamiento y valorización de sargazo debido a esta problemática se encuentran principalmente en productos como fertilizantes, biogás, construcción, bioplásticos, cosmética y farmacéutica. Esto es posible gracias a los polisacáridos característicos del alga antes mencionados como agentes gelificantes, espesantes o para síntesis de bioplásticos en el caso de los alginatos, como compuestos con actividades antioxidantes, antiinflamatorias y beneficiosos a la salud humana en el caso de los fucoidanos y laminaranos; como materiales de refuerzo, para producción de biocombustibles, textiles y productos biodegradables partiendo de la celulosa. Por lo anterior se puede estimar que el sargazo es una fuente importante de productos con valor agregado (Owusu et al., 2024). Sin embargo, el sargazo presenta altas concentraciones de arsénico, lo que puede limitar su uso en varias aplicaciones por su alta toxicidad (López-Miranda et al., 2021), representando un riesgo por su uso en alimentos, como un material primario o secundario con potencial tóxico y contaminante (Azcorra May, 2021).

La investigación y el desarrollo tecnológico han permitido mejorar la selectividad de extracción de los diferentes compuestos de matrices lignocelulósicas, mediante procesos diseñados para las características de la fuente. Sin embargo, se busca que sean menos tóxicos, peligrosos y contaminantes, pero con el mayor aprovechamiento del recurso como son métodos tradicionales asistidos con microondas o ultrasonido para reducir las concentraciones de reactivos y tiempos. Las propuestas convencionales de los procesos de extracción generan problemas ambientales por el desperdicio de los recursos por falta de optimización e impactos ambientales severos por la toxicidad y cantidad de sus desperdicios y desechos. Uno de los procesos más utilizados para la extracción de compuestos como la celulosa es la hidrólisis. Esta puede ser alcalina o ácida, pero para obtener la mayor cantidad se necesitan ajustar y adecuar las concentraciones de los reactivos y la cantidad de energía del proceso.

Es por eso por lo que en esta investigación se busca evaluar la concentración de arsénico y el rendimiento de extracción de celulosa con un método alcalino a partir de sargazo recolectado en la línea de playa de Puerto Morelos; para lo cual se estudiaron los métodos reportados en la literatura, seleccionando el proceso de peroxidación alcalina y realizando variaciones correspondientes al diseño experimental de superficie de respuesta y evaluar su rendimiento para maximizar la extracción de celulosa mediante la variación de concentraciones de los reactivos, tiempos y temperaturas, para así determinar las mejores condiciones del proceso con base al rendimiento obtenido. Dado el potencial tóxico del arsénico, se evaluó la concentración de este metaloide al inicio y al final de cada proceso con la finalidad de garantizar que la celulosa obtenida se encuentre libre de este elemento o en bajas concentraciones para su uso seguro en subproductos y aplicaciones potenciales como temas de estudios a futuro.

## Planteamiento del Problema

El sargazo, como es conocido comúnmente, es una macroalga parda holopelágica que se concentra abundantemente en el Océano Atlántico y la zona ecuatorial en el llamado “Mar de los Sargazos” y “Nuevo mar de sargazo” que es el “Gran Cinturón de Sargazos del Atlántico”, como se observa en la Figura 1. Estos nombres se le atribuyen debido a que se estima una biomasa entre 4 y 11 millones de toneladas del alga, abarcando un área de aproximadamente 3 millones de metros cuadrados. Estos “mares” están influenciados por corrientes del Golfo, el Atlántico Norte, Canarias y Ecuatorial del Norte (Suárez, 2018) permitiendo que la distribución de las algas, debido a las corrientes marinas, lleguen a costas de Europa Occidental, Marruecos, Ghana, Brasil, Uruguay, Nicaragua, el Caribe y sus islas.

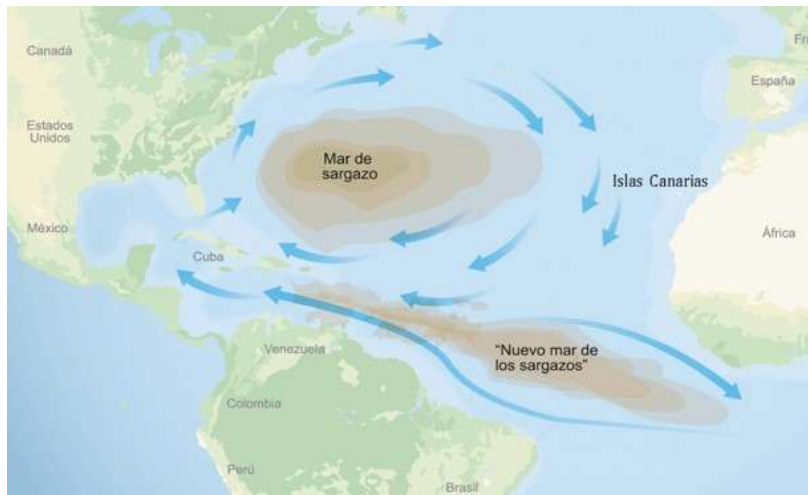


Figura 1 Mapa del Atlántico con el mar y nuevo mar de sargazos. IEM, 2024

En 2011 se recibieron arribazones inusuales de sargazo de tipo *Natans I*, *Natans VIII* y *Fluitans III*, que son los que conforman al *Sargassum spp.* en las islas del Caribe y costas de África occidental. Este fenómeno conllevó afecciones económicas, ambientales y sociales a los poblados, dando lugar a las investigaciones del alga. Por consiguiente, en México y Estados Unidos se crearon centros de investigación y monitoreo del sargazo, como es el Grupo Interdisciplinario para el Estudio del Sargazo (GIES) en México y el Sargassum Watch System (SaWS) en E.U. que calcularon que las mayores cantidades del alga fueron en Cancún y Puerto Morelos en México (Dreckmann, 2013). Para el 2015, después de diversos eventos como ciclones y la misma circulación de las corrientes, se reportó una cifra mayor a la histórica máxima del 2011 (Ortegón & Ávila, 2020). En 2018 se estimó un arribazón aún mayor que llegó a 54,197.568 toneladas en el

mes de agosto (SEMAR, 2024), siendo este uno de los arribazones más grandes reportados hasta 2022, ya que llegó hasta 63,252.72 toneladas en el mes de mayo, como se observa en la Figura 2.

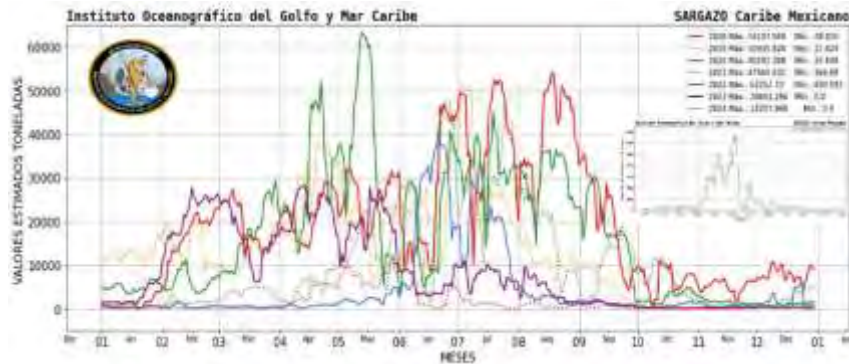


Figura 2 Histórico de arribo 2018-2024. IOG,2024

Estos arribazones, además de dañar el panorama de estas costas, representan problemáticas en diversos ámbitos, ha producido que tanto los visitantes como lugareños limiten su acceso al mar por la incómoda sensación y aroma desagradable por su descomposición que genera gases de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), metano ( $CH_4$ ) e incrementa la emisión de gases de efecto invernadero; afectando la salud humana, calidad de aire y composición bioquímica del ecosistema costero, debido a los lixiviados que producen compuestos como taninos, nitratos, fosfatos y metales. (SEMARNAT, 2021). Esta situación ha forzado al desarrollo de alternativas de disposición y aprovechamiento de la macroalga, desde fertilizantes y aditivos para mejora de suelo (Motta & Rodriguez, 2020); hasta biopolímeros y biocombustibles (Azcorra May, 2021).

El sargazo como todo organismo fotosintético, produce grandes cantidades de oxígeno durante sus periodos de respiración y de fotosíntesis, respectivamente, y al requerir de altos niveles de luz solar ( $200 - 300 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) (EPA, 2023) necesita mantenerse en flotación constante, por lo que, si esta llega a hundirse, no logra sobrevivir y comienza a descomponerse. Cuando se queda varada en las playas ocasiona múltiples efectos negativos entre los cuales está la pérdida de pastos marinos, afectación de arrecifes coralinos, emisión de gases y lixiviados, reducción de luz al fondo marino, alteración de calidad del aire, agua y sedimento, etc (Maurer, 2015) (Hernández-Arana, 2020). El *Sargassum* puede bioacumular diferentes micro contaminantes como compuestos aromáticos policíclicos (HAP), policlorobifenilos (PCBs), pesticidas, entre otros. Al igual que otras algas pardas, se ha demostrado que el sargazo bioacumula una gran cantidad de metales pesados, junto

con los compuestos orgánicos; en donde destaca la alta fitoacumulación del metaloide arsénico; los niveles encontrados son motivo de preocupación en todas las aplicaciones potenciales, en particular para uso humano y animal (Devault D. M., 2022); (Devault D. P., 2021).

En México, el gobierno federal asignó \$3.2 millones de dólares a la extracción del sargazo en 2015, pero la cantidad de macroalgas marinas excedió la capacidad para eliminarlas (Hernández, 2023). Es por esto por lo que la búsqueda e implementación de soluciones alternativas para aprovechar o disponer el alga, es de gran importancia para la economía y preservación ambiental de las costas donde llegan estos arribazones. Aunque parecía que el problema se había reducido a cantidades mínimas, en 2025 se ha dado un repunte histórico de los arribazones de esta macroalga llegando hasta 86,074 toneladas del alga (IOGMC, 2025) como se observa en la Figura 3. Varias estrategias se han desarrollado para enfrentar esta problemática con la gestión y el aprovechamiento del alga para sectores energéticos, biomédicos y productos de valor agregado (Alvarado Salazar, 2021). Sin embargo, no han sido suficientes los esfuerzos por la masiva cantidad del alga, baja inversión y estudio de alternativas del aprovechamiento para mitigar el impacto ambiental y económico de una forma amigable con el medio ambiente (Rodríguez-Martínez R. E.-D.-P., 2021).

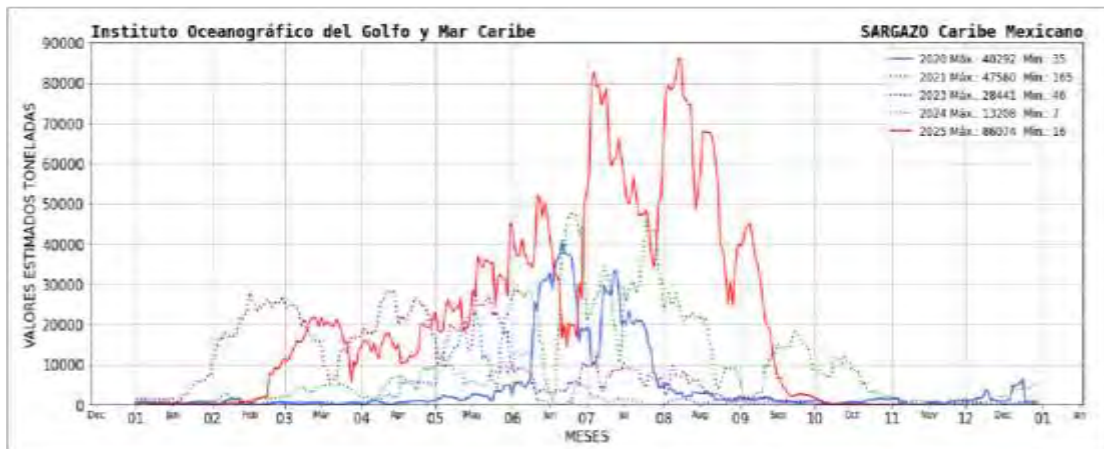


Figura 3 Boletín I.O.G.M.C. NÚM. 1248, 2025

A partir de la problemática que representa esta macroalga depositada en las costas del Caribe Mexicano, se empezaron a realizar diversas investigaciones para el aprovechamiento de sus diferentes componentes como aditivo alimenticio, aprovechamiento de alginatos y generación de biocombustibles (Suárez, 2018). Esto es posible debido a su composición química como biomasa lignocelulósica; esto quiere decir que dentro de sus componentes se encuentran carbohidratos, proteínas, lípidos, minerales, etc., presentando componentes característicos principales como lignina, celulosa y hemicelulosa (Chávez , Perez , & et. al, 2022) .

La abundancia de la celulosa en la naturaleza le permite ser considerada como un material con alto potencial de aprovechamiento y como alternativa sostenible de los materiales del petróleo. A esta ventaja se le suma la versatilidad de aplicaciones por sus propiedades tales como biodegradabilidad, biocompatibilidad, carácter renovable, no tóxico, alta resistencia mecánica y su naturaleza hidrofílica e higroscópica (Machado, 2024).

Este biopolímero presenta beneficios por sus aplicaciones en diferentes productos y procesos, promoviendo el desarrollo económico y tecnológico de las regiones con abundancia de recursos lignocelulósicos (Espinosa-Antón, 2024). Normalmente, las fuentes principales de celulosa son terrestres, como la madera y el algodón (Baghel, 2021), y para su extracción es necesario separarla de otros compuestos como la lignina, hemicelulosa, grasas, ceras y aceites, para lo cual es necesario someter procesos de extracción agresivos para su eliminación, provocando impactos ambientales por la generación de efluentes y residuos tóxicos (Woźniak, 2025).

Para poder extraer la celulosa del sargazo, se realizó una revisión detallada de los procesos, reactivos y equipos para dicho propósito, ya que existen diferentes métodos físicos, químicos, mecánicos, biológicos y combinados con variaciones de condiciones, reactivos, equipos y procedimientos que han sido desarrollados y aplicados en diversos recursos naturales; sin embargo, en la literatura es posible encontrar reactivos constantemente utilizados en estos procesos, partiendo de un agente deslignificante y uno encargado del blanqueamiento del producto. Sin embargo, en la bibliografía registrada podemos encontrar procesos tradicionales que son altamente contaminantes, peligrosos, tóxicos y altos costos energéticos (Rasaq S. & et. al , 2024). Por esta razón, la selección del proceso para esta investigación considera que el proceso de extracción no

sea tóxico, peligroso y no contaminante que permita obtener el mayor rendimiento de obtención de celulosa con la concentración de arsénico más baja en el producto de la reacción.

Los procesos de extracción más comunes son los métodos químicos, ácidos y alcalinos, principalmente por su eficacia en la deslignificación (Moohan et al, 2019). Para minimizar el impacto ambiental y toxicidad de dichos procesos, han surgido tecnologías más verdes que permiten realizar los procesos de extracción de una forma más sostenible, destacando entre ellas técnicas como la asistencia con ultrasonido y microondas permitiendo procesar en menor tiempo, con menos energía y reactivos químicos, para aumentar el rendimiento del proceso mediante la mejora de la selectividad (Rasaq S. & et. al , 2024)

Enfrentamos también el problema de su viabilidad con estas técnicas asistidas con tecnologías verdes, pero requieren condiciones muy controladas y específicas, además de una alta demanda energética (Abolore & et. al, 2024), altos costos de solventes como los líquidos iónicos y eutécticos (Modenbach & Nokes , 2012) y riesgos como cavitación excesiva por microondas (Yang & Zhu , 2017) , baja disponibilidad de las tecnologías en México y falta de inversión pública o privada para la recolección del alga (Chávez V. R.-M.-P., 2023) para el manejo de la biomasa y aprovechamiento. Aunque existen diversas formas en las que se ha aprovechado el sargazo, la extracción de celulosa de este recurso no ha sido estudiada a fondo, por lo tanto las condiciones, parámetros y consideraciones para la obtención de un recurso tan valiosos como la celulosa, nos permite presentar este proyecto como fundamento para sentar las bases de su escalamiento para enfrentar la problemática actual de los arribazones masivos de sargazo en el caribe aunque no sea parte de los alcances de este trabajo. Por lo tanto, aunque este estudio tampoco tiene el alcance de hacer una propuesta de valorización completa del alga ni un estudio económico por productos de valor agregado o economía circular, es necesario buscar alternativas que puedan ser más asequibles en costos y recursos, prácticas y sin generar otra fuente de contaminación mayor o transferida. Así con este proyecto se establece un punto de partida del aprovechamiento máximo de celulosa del alga para diversas potenciales aplicaciones e industrias con bajo potencial tóxico y como estrategia para minimizar el impacto ambiental negativo debido al fenómeno natural en las costas del Caribe mexicano. Se muestra un diagrama de árbol en forma de resumen del planteamiento del problema en la Figura 4.



Figura 4 Árbol de problema de la investigación. Elaboración propia, 2025

## Justificación

Debido las sumas descritas de las toneladas de arribo de sargazo en las costas del Caribe y sus pronósticos, se considera como un fenómeno recurrente cada año (Wang, 2017), por lo que podemos considerar al sargazo como una fuente ideal para generar productos de valor agregado como es la celulosa.

Estudios reportan que las algas contienen del 1 al 34% de celulosa variando entre algas rojas, pardas y verdes (Muthukumar, 2023), Su ciclo de arribo al Caribe es anual por ruta de las corrientes marinas, normalmente llegando el pico de arribazones en temporada de primavera-verano por los meses de abril a agosto y septiembre a octubre, dependiente de los eventos como ciclones y huracanes con un arribo medio y de noviembre a marzo es la recuperación del ecosistema, por lo que se considera temporada baja o nula. (Van Tussenbroek, 2017). El inconveniente que se tiene son los altos contenidos del metaloide arsénico, el cual es potencialmente tóxico, provocando afecciones crónicas a la salud humana por el consumo o contacto (Rangel Montoya, 2015). Por lo que es necesario implementar medidas para garantizar la reducción del contenido de este elemento en cualquier producto derivado del sargazo.

En la Tabla 1, se muestran los reportes del total aproximado de toneladas retiradas de las costas de Quintana Roo, ya que es el estado que presenta la mayor problemática en los arribazones por proximidad a las corrientes marinas que arrastran el alga desde el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico hasta las playas. También en la Tabla 1 se muestran los años de mayor cantidad reportada por parte del estado e informes de sargazo retirado en el año en peso húmedo, llegando a sumar aproximadamente 540 mil toneladas.

*Tabla 1 Recopilación de cantidades totales retiradas por año de sargazo de las costas del estado de Quintana Roo. Elaboración propia.*

<b>Lugar</b>	<b>Periodo estacional de arribo</b>	<b>Total anual retirado (t)</b>	<b>Ref</b>
<b>Quintana Roo</b>	<b>2015</b> (Abril - Septiembre)	200,000	(Rodríguez-Martínez et al., 2021)
	<b>2018</b> (Abril - Octubre)	540,000	(SEMARNAT, 2023)
	<b>2019</b> (Abril - Septiembre)	200,000	(Chávez et al., 2023)
	<b>2022</b> (Abril - Octubre)	50,000	

Por lo tanto, esta investigación permite proponer una estrategia de aprovechamiento para una fracción de la macroalga, la cual está enfocada en la evaluación de un proceso alcalino de extracción de celulosa de biomasa lignocelulósica, empleando al sargazo como matriz y establecer las condiciones óptimas de máximo rendimiento de celulosa y a través de la cuantificación de arsénico total presente [por medio del análisis de Espectrometría de Emisión Óptica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES)] en mg de arsénico por kilogramo de sargazo en su estado natural y en la celulosa como producto final.

La celulosa como biopolímero tiene una extensa lista de aplicaciones, desde lo tradicional como producción de papel, fibras y textiles (Arias Ruiz , 2023) hasta implementaciones biomédicas como andamios, biotintas y nanofibras (Seddiqi, 2021), biocombustibles como bioetanol (Beevi Ummalya, 2024), farmacéutica, cosmética, entre otros.

El contenido de arsénico en el sargazo es relevante para esta investigación ya que, para poder aprovechar la celulosa del alga y sentar las bases de su máximo rendimiento asegurando su bajo potencial tóxico para sus variadas aplicaciones, es el elemento que está constantemente presente y a altas concentraciones en diferentes costas del atlántico y en las diferentes especies de algas, considerando su capacidad de adsorción de metales como se observa en la Tabla 2. Aunque en el alga pueden presentarse diversos metales y compuestos tóxico-contaminantes, se seleccionó el de mayor presencia y concentración por el potencial tóxico.

Tabla 2 Concentración de oligoelementos ( $\text{mg kg}^{-1}$ , dw) en especies y morfotipos de sargazo bentónicos y pelágicos en el Océano Atlántico reportados en otros estudios. Rango y/o media ( $\pm$ DE). Ortega Flores, 2022

Especies pelágicas	Sitio	Arsénico	Cadmio	Cobre	Hierro	Plomo	Zinc
Sargazo sp.	Nigeria	–	–	–	87.0	–	0.5
Sargazo sp.	Ghana	13–53.5	80–111	22–36	1226–5910	86–335	22–100
Sargazo sp.	República Dominicana	13.6–42.3	0.12–0.31	1.6–11.8	20–655.3	0.98–1.96	12.7–20.6
S. fluitans S. natans	Sur de la Florida	116,16–119 89,81–103	- -	- -	- -	- -	- -
S. fluitans S. natans I S. natans VIII Sargazo pelágico	Islas Turcas y Caicos	26,25 29,76 20,94 123,69	0,12 0,12 0,09 0,13	2,91 2,71 1,25 2,51	262,02 998,56 81,58 3811,37	0,37 0,28 0,48 0,26	35,64 30,88 26,49 5,81
S. fluitans III S. natans I S. natans VIII Sargazo pelágico	Caribe Mexicano	34–172 32–172 24–145 24–172	- - - <2	- - - <6–540	- - - <3–11	- - - <2–3	- - - <5–17
S. fluitans III S. natans I S. natans VIII	Jamaica	58,32 $\pm$ 2,29 64,91 $\pm$ 0,61 60,30 $\pm$ 0,34	0,57 $\pm$ 0,02 0,77 $\pm$ 0,43 0,40 $\pm$ 0,02	4,47 $\pm$ 0,20 4,29 $\pm$ 0,16 2,78 $\pm$ 0,14	832,97 $\pm$ 101,84 634,79 $\pm$ 18,18 237,07 $\pm$ 44,26	1,11 $\pm$ 0,47 2,47 $\pm$ 1,79 0,33 $\pm$ 0,13	7,2 $\pm$ 1,20 14,71 $\pm$ 1,98 6,35 $\pm$ 0,62
Sargazo pelágico	Caribe Mexicano	29.0–65.70	0.32–1.36	<0,02–1,09	25.9–54.6	<0,02–0,29	3.64–7.2
S. fluitans III S. natans I S. natans VIII	Caribe Mexicano	26,4–255,2 77,80 $\pm$ 5,12 9,5–186,2 58,93 $\pm$ 3,49 38,8–236,1 87,41 $\pm$ 5,64	<0,02–2,6 0,54 $\pm$ 0,07 <0,02–3,1 0,58 $\pm$ 0,07 <0,02–2,3 0,77 $\pm$ 0,08	<0,01–6,4 2,85 $\pm$ 0,22 <0,01–5,7 2,34 $\pm$ 0,19 <0,01–3,8 1,55 $\pm$ 0,15	<0,07–78,2 27,11 $\pm$ 2,04 <0,07–59,9 24,17 $\pm$ 1,31 2,90–71,1 19,35 $\pm$ 1,53	<0,05–18,5 4,57 $\pm$ 0,63 <0,05–17,0 6,15 $\pm$ 0,52 <0,05–20,7 4,19 $\pm$ 0,72	<0,02–27,4 4,99 $\pm$ 0,62 <0,02–24,4 4,76 $\pm$ 0,57 <0,02–62,8 5,99 $\pm$ 1,28
Especies bentónicas							
Sargazo sp.	Brasil	–	0.4–1.45	6–16.8	1100–1502	6.2–11.1	13.5–27.1
S. filipendula	Colombia	–	–	3.5	28.8	–	11.6
S. buxifolium	Cuba	2.1–7	2–3.4	8.4–11.1	40–84	–	13–22

## Hipótesis

Las condiciones del proceso de extracción alcalina, específicamente la concentración de NaOH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la temperatura y el tiempo, permite maximizar el rendimiento de celulosa y reducir la concentración de arsénico total en biomasa de *Sargassum spp*, mediante la metodología de superficie de respuesta

## Objetivos

General:

Determinar las condiciones óptimas del proceso alcalino de extracción para maximizar el rendimiento de celulosa y minimizar la concentración de arsénico total a partir de *Sargassum spp*. mediante un análisis de superficie de respuesta

Específicos

- Caracterizar la biomasa inicial de sargazo por medio de análisis estructurales, térmicos, contenido elemental y arsénico a partir de FT-IR, TGA, DRX, ICP-OES, análisis de COT, CHONS, STF y STV.
- Evaluar el efecto de la concentración de NaOH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la temperatura y el tiempo de reacción sobre el rendimiento de celulosa obtenida a partir de *Sargassum spp*. mediante un proceso de extracción alcalina.
- Optimizar las condiciones del proceso de extracción alcalina utilizando un diseño de superficie de respuesta, para maximizar el rendimiento de celulosa y minimizar la concentración de arsénico en el producto final.
- Caracterizar las muestras de celulosa obtenidas mediante FT-IR, TGA, DRX y determinar la concentración de arsénico total presente en las muestras tratadas bajo diferentes condiciones del proceso, con el fin de identificar los parámetros que favorecen su remoción.

## Línea del conocimiento de la investigación

Se considera que el objetivo del presente estudio es parte de la metodología para la Producción más Limpia (P+L), enfocada a la línea de generación y aplicación del conocimiento (LGA) de control y prevención de la contaminación.

## Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) se han establecido 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible como parte de la Agenda 2030. Dentro de este trabajo de investigación se considera que contribuye en los objetivos: 9, 12, 13 y 14 (Figura 5)



Figura 5 ODS. OMS,2024

# Capítulo II

## Marco teórico

### Algas

La ficología es la disciplina encargada del estudio de la diversidad de las algas marinas; esta define las algas como organismos fotosintéticos que de acuerdo con el tipo de células fundamentales se pueden identificar y clasificar para su estudio (Soo Park & Zhun Li, 2022). Esta clasificación de algas es procariota, que representa específicamente a las cianobacterias o algas verde azules; y las algas eucariotas donde contienen al resto de las algas por grupos de acuerdo con su composición pigmentaria (Lee, 2008). Las algas son talofitas, lo que significa que no tienen raíces, tallos ni hojas diferenciadoras (García-García, 2020). La estructura de estos organismos varía desde microalgas unicelulares que coexisten en colonia y multicelulares como las macroalgas que llegan a longitudes de hasta 50 m (León-Alvarez & et. al, 2017) y tienen un papel importante en la estructuración y mantenimiento de los ecosistemas marinos debido a su significativa contribución de oxígeno (Macho Stadler, 2024).

Debido a su capacidad autotrófica, usan la luz solar para capturar dióxido de carbono y producir materia orgánica como azúcares por fotosíntesis (Soo Park & Zhun Li, 2022). Sin embargo, algunas especies algales pueden ser heterotróficas o mixotróficas, permitiendo su nutrición y crecimiento mediante nutrientes solubles, compuestos u organismos del medio (Lee, 2008). Las algas pueden reproducirse sexualmente mediante los gametofitos que producen por sí mismas. Estas esporas se asientan en las diferentes plantas masculinas o femeninas donde presentan variedades de ciclos reproductivos y de vida variables, dependiendo de la especie, generación y condiciones; incluso algunas pueden reproducirse de forma asexual por medio de la fragmentación o división (Decología.info, 2024).

La clasificación de las especies radica en tres grupos principales, como *Rhodophyta* que son las algas rojas; caracterizadas por ser organismos sin células flageladas y con presencia de clorofila alfa y ficobiliproteínas. *Chlorophyta* que son las algas verdes que contienen clorofilas alfa y beta y carotenoides, como las plantas de tierra, además de que el 90% de las especies son dulceacuícolas.

*Heterokontophyta* donde se encuentran las algas pardas o *Phaeophyceae* que contienen clorofilas alfa, C1 y C2, laminarina y fucoxantina que es el pigmento encargado de dar la apariencia de color pardo (Batista de Vega & et.al, 2022). Su gama de colores puede ir desde amarillo hasta rojo y su importancia recae en filtrar el agua y ser hábitat para algunas especies. (EcoExploratorio, 2024).

Las algas tienen una compleja composición de macronutrientes como el calcio, magnesio, potasio, cloro, azufre, y fósforo; así como macronutrientes como yodo, hierro, zinc, cobre, selenio, molibdeno, fluoruro, manganeso, boro, níquel, cobalto y vitaminas B12, A y K (Motta & Rodríguez, 2020). Su pared celular generalmente es rígida en el caso de las procariotas, compuesta por una estructura micro fibrilar y una amorfa; donde el esqueleto fibrilar es la celulosa y en el caso de algunas algas rojas, la celulosa se reemplaza por xilano y manano; y los amorfos ficocoloides son polisacáridos como el ácido algínico y fuidina en las algas pardas; y galactanos, agar y carragenina en algas rojas (Lee, 2008).

La importancia ecológica y ambiental de las algas es crucial por ser el grupo productor trófico primario marino y dulceacuícola, producción entre el 30 y 50% del oxígeno atmosférico (Soo Park & Zhun Li, 2022) y proporcionan un ecosistema de hábitat para especies como peces, crustáceos, tortugas, etc. (Leal Bautista & et. al, 2020). Dentro de su valor ambiental funciona como bioindicadores en biorremediación por su capacidad de absorber metales pesados y nutrientes en excesos en el medio (Arias Ruiz , 2023) .

## Sargazo

El nombre de sargazo es el que se designa a las macroalgas del género *Sargassum* (Aldana Aranda, 2020). El *Sargassum* como se observa en la figura 7, pertenece a las algas pardas y se encuentran dispersas aproximadamente 450 especies en mares tropicales y subtropicales (Leal Bautista & et. al, 2020) como el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GCSA) por sus siglas en inglés, que está presente desde el oeste de África hasta el este de Brasil con un largo de 9,000 km (Aldana Aranda, 2020) Este género se diferencia por el talo, su desarrollo en forma arbustiva y floides generalmente con aerocistos en su base. Su reproducción es influenciada por las condiciones ambientales de temperaturas, fenómenos naturales y fenómenos de causa antropogénica. La mayoría de las especies de *Sargassum*, en su morfología, presenta una gran plasticidad fenotípica que hace difícil su identificación entre especies pelágicas y betónicas. (Hernández, 2023). Las especies pelágicas son las componentes del mar de sargazos. Sus especies características de este “mar” son *Natans* y *Fluitans* (Roig-Munar, 2022), de tipo holopelágico, morfotipo *Fluitans III*, *Natans I* y *Natans VIII* principalmente (Stiger, 2022). significa que son algas flotantes que habitan en la superficie del océano por toda su vida y que lo componen diversas especies de *Sargassum* pelágico (Paulino Frías, 2023). Su identificación como spp o sp viene del latín de “*species pluralis*” significa “especies múltiples” (Sariñana-Aldaco, 2021). Su relevancia de estudio radica en la problemática ambiental, económica y de salud al estar depositado en los productos con los que estamos en contacto constante.



Figura 6 El *Sargassum*. Imagen Héctor Ruiz, (EcoExploratorio, 2024)

Los polisacáridos que se encuentran abundantes en las algas pardas son los alginatos, fucoidanos y laminaranos, que tienen una alta importancia comercial debido a su uso en diversas industrias que aprovechan sus propiedades físicas como la capacidad de gelificación, retención de agua y su capacidad para formar emulsiones (Motta & Rodriguez, 2020).

De las algas se producen polisacáridos como alginatos, laminaranos y fucoidanos con grandes proporciones de L-fucosa, grupos ésteres y azúcares como xilosa y manosa (MarcadorDePosición1) y ácido glucurónico (Motta & Rodriguez, 2020).

La importancia del sargazo por sus propiedades y valorización es la presencia de alginatos. Los alginatos son sales de ácido algínico, las cuales en su estado natural forman geles con iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Sr}^{+2}$  y  $\text{Ba}^{+2}$  dando fuerza y flexibilidad al alga. (Motta & Rodriguez, 2020). Un estudio bromatológico reporta una composición diferenciada entre las especies respecto a la proporción entre celulosa, hemicelulosa y demás compuestos; reportando los promedios de caracterización de 82% de humedad, 30% de cenizas, 6% de extracto etéreo, 8.7% de proteína cruda y 54% de celulosa-hemicelulosa. (Pereira, 2022) y (Alvarado Flores, 2022) reporta 12.86% de hemicelulosa, 15.73% de celulosa, 13.15% de lignina y 58.22% de extraíbles.

Otros compuestos identificados incluyen vitaminas (A, B1, B2, B3, B9, B12, C y E), pigmentos (carotenoides y xantofilas), aminoácidos esenciales, ácidos grasos insaturados, reguladores del crecimiento vegetal (auxinas, giberelinas y citoquininas) y metabolitos secundarios (compuestos fenólicos, saponinas, alcaloides y terpenos). Los compuestos fenólicos se componen principalmente de florotaninos, oligómeros y polímeros de floroglucinol; además de esteroides, fenoles hidrolizables, catequina y saponinas en las especies de *Fluitans* y *Natans* (Alvarado Salazar, 2021).

En la Tabla 3 se pueden visualizar los datos reportados por diversos estudios respecto al *Sargassum spp.* Sin embargo, es importante mencionar que dichos estudios seleccionaron algunas de las especies que componen el sargazo holopelágico, como algas verdes, pardas y rojizas; por lo que observamos que la cantidad de componentes puede variar por especie y condiciones climatológicas.

Tabla 3 Comparativa de estudios diversos del *Sargassum. Spp.* Elaboración propia

Compuestos	Paletta R, 2024 (%)	Perez R, 1997	Espinosa-Anton, 2024	Alvarado Salazar, 2021 (%)	Martinez, 2020 (%)	Oyesiku, 2014 (%)
Carbohidratos	51.9	45.51 a 47.14 %	11-59%		57.3	57.3
Lípidos	1.65	0.23 a 0.25%	4%	0.53	2.5	
Proteínas	0.62	3.86 a 11 a 12 %	2-15%	4.63	15.4	15.4
Cenizas		29.93 a 27.54%	9-47%	18.40		8.65
Fibra cruda		10.80 a 10.51%	7-33%			7.15
Alginato				15-25		2.5
Fucoidanos				3-12		
Compuestos fenólicos				5-15		
C/N	8	-				6.360.
Na	1.22	363.56 mg/100 g				
K	3.36	222.88mg/100 g				28.0
Ca	1.93	142.52 mg/100 g				
Mg		51.44 mg/100 g				42.75
P		18.40 mg/100 g				96.5
Cu		0.21 mg/100 g				
Zn		0.01 mg/100 g				0.05

## Impacto ambiental del sargazo

El *sargassum* pelágico proporciona sustrato, refugio y zonas de alimentación para invertebrados, tortugas, y peces; sirve de zona de desove y cría para muchos organismos de importancia ecológica y comercial como los jureles. Además, estas “manchas flotantes” son reservas globales importantes de carbono por la gran cantidad reportada de biomasa; en consecuencia, mitigan el cambio climático al remover el CO<sub>2</sub> (Hernández, 2023).

Los efectos adversos que genera la gran biomasa algal que termina en la costa, destaca la erosión de playas, la disminución en la cobertura de comunidades de pastos marinos, la contaminación de playas debido a la descomposición in-situ del material algal y la contaminación de mantos freáticos por lixiviados; siendo una de las causas más alarmantes las malas prácticas relacionadas con los sitios de disposición final del alga, afectando también al sector turístico y las comunidades aledañas (Motta & Rodriguez, 2020).

Los efectos de los arribazones masivos del sargazo parecen deberse a una combinación de factores ambientales como la eutrofización por contaminación humana atribuida a derrames del río Amazonas y África occidental, permitiéndoles tener mejores condiciones para su desarrollo junto con las condiciones oceánicas en constante cambio de temperatura. (SEMARNAT, 2021)

## Lignina

La lignina es un polímero fenólico, amorfo y tridimensional, compuesto por anillos aromáticos en su estructura; responsable de la unión de las fibras de celulosa como se muestra en la Figura 7. Por ser un material que se encuentra en abundancia en el planeta, puede ser de diferente composición en función de la especie y la parte de donde se extraiga. Esta sirve, por ejemplo, en las hojas, como un indicador de la nutrición solar o modificar el grado de descomposición. (Márquez, Cuji, Méndez, & Flores, 2021).

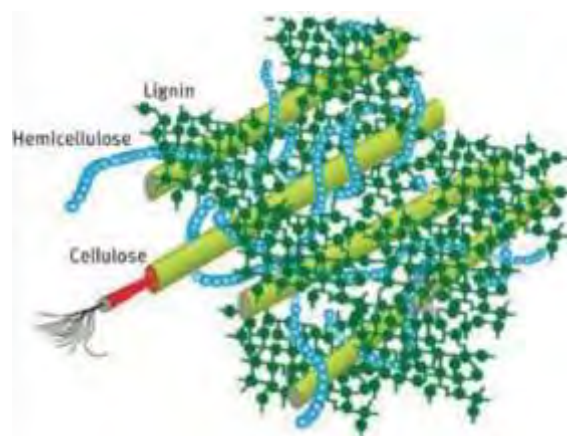


Figura 7 Esquema de estructura. (Vallejos, 2024)

La aplicación de la lignina es amplia, como por ejemplo para carbón activado después de un proceso de pirólisis usado en tratamiento de aguas residuales (Márquez, Cuji, Méndez, & Flores, 2021). También se puede emplear para resinas fenólicas como sustituto del fenol químico, adhesivo natural para medicinas, alimentos, textiles, materia prima para la fabricación de fibras de carbono y como antioxidante de polímeros termoplásticos (Acosta, 2022)

## Celulosa

La celulosa es el polímero más abundante en la tierra, constituyendo una gran parte de la estructura química de las plantas, ya que se encuentra en su pared celular. Es un polisacárido lineal hidrofílico que le proporciona resistencia y rigidez a las plantas por el empaquetamiento cristalino de las cadenas poliméricas de B-1,4 glucosa, unidas por enlaces éter en las posiciones C1 y C4 que son las formadoras del compuesto de celobiosa. (Salazar, 2023)

La celulosa proveniente de las algas tiene una gran similitud a las plantas terrestres, y patrones de forma análoga a la celulosa que se extrae del algodón de forma que propicia una valorización con alto potencial de aprovechamiento sustentable, ya que, para obtener la celulosa como producto derivado de plantas, sus demás componentes resultan como elementos limitantes necesitando de mayor uso de energía y recursos; por lo que la extracción de la celulosa de las algas resulta más fácil. (Fernandez & Gerardiny, 2022)

Dentro de las principales aplicaciones de la celulosa podemos encontrar una amplia gama, hablando de materiales sostenibles y con propiedades únicas, como la alta resistencia,

transparencia, biodegradabilidad, biocompatibilidad y ligereza (Vallejos, 2024). También se considera como uno de los materiales innovadores contemporáneos más importantes en los últimos años. (Carvalho et al., 2024).

Debido a su versatilidad y sostenibilidad como material, su potencial benéfico en su implementación en la industria estima una alta contribución en aspectos económicos, ambientales y sociales (Vallejos, 2024). La gama de productos derivados de las algas, pero en específico del *Sargassum spp.* destacan fertilizantes, productos alimenticios, biorremediación, biocombustibles, pigmentos, alimentos para animales, etc. Sin embargo, la aplicación de la celulosa radica en filtros y papel con esa base y de nanocelulosa en láminas 2D para producción de bioplástico (Chávez , Perez , & et. al, 2022)

## Procesos de extracción de celulosa

La estructura compleja de los materiales lignocelulósicos dificulta la separación de sus componentes de alta pureza y calidad para ser aprovechados como recursos de aplicaciones para la industria (Alba N. & et. al, 2024). En esta estructura, las interacciones covalentes y los puentes de hidrógeno son las fuerzas más abundantes e importantes que proporcionan rigidez a la celulosa (Moohan et al, 2019), especialmente la hemicelulosa que funciona como aglutinante entre la lignina y la celulosa (Lozano-Calvo et al, 2024). Debido a esto los tratamientos de extracción buscan romper especialmente estos enlaces, específicamente en los grupos hidroxilo de la hemicelulosa y con los grupos hidroxilo fenólicos de la lignina para liberar las fibras (S. Abolore et al, 2024).

### *Tratamientos físicos*

#### Mecánicos

Los tratamientos físicos para extracciones se basan en la aplicación de fuerzas mecánicas que permitan una disrupción efectiva sobre las estructuras celulares de los materiales lignocelulósicos. Estas tecnologías abarcan desde la trituración y molienda del material permitiendo que, al reducir el tamaño de la partícula, aumente la superficie de contacto.

### Asistidos con microondas

También dentro de los tratamientos físicos se encuentran la extracción asistidos con microondas (MAE) por sus siglas en inglés, que provoca la ruptura de la pared celular por medio de ondas de alta frecuencia calentando dieléctricamente la superficie del tejido vegetal y el disolvente utilizado, permitiendo la absorción de la energía además del aumento de vapor y presión (Lozano et. al., 2024). Este proceso usa disolventes como etanol, metanol y agua que pueden absorber la energía de la manera óptima por su polaridad, permitiendo que la efectividad de la cinética aumente debido a la mejora de la solubilización por la disminución de la tensión superficial y viscosidad. (Vinhas et al, 2023).

### Asistidos con ultrasonido

Los procedimientos asistidos por ultrasonido para biomasa lignocelulósica funcionan mediante ondas ultrasónicas que producen la cavitación acústica permitiendo que la pared celular pueda romperse (Liu, 2022). Las ondas generan el aumento de temperatura y presión permitiendo que mejore la transferencia de masa del solvente a la estructura del material (Mohan, Mohd Yusof , & et. al, 2024).

### *Tratamientos químicos*

#### Alcalinos

Normalmente los procesos con álcalis se emplean como pretratamiento para romper enlaces éster entre la lignina y la hemicelulosa causando que las fibrillas de la celulosa se expandan y promueva la solubilización de la lignina (Beevi Ummalyma, 2024) Los reactivos comúnmente empleados para estos procedimientos son el hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH) y amoníaco, siendo el primero el más eficiente y económico (Lozano-Calvo et al, 2024). El empleo de este reactivo es empleado en un rango amplio de temperaturas, desde hasta 120° C en concentraciones del 25 al 30% (Alba N. & et. al, 2024) hasta poder usarlos en temperaturas de 20 a 40° C donde se ha comprobado, además de la reducción del consumo energético, el daño a la hemicelulosa es mínimo (Lozano-Calvo et al, 2024)

#### Ácidos

Para los procesos ácidos se emplean reactivos como el ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>, ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), siendo este último es más común por

su costo bajo del reactivo y permite obtener altas eficiencias (Vincent & et. al, 2019). Su mecanismo de reacción es por medio de la ruptura de enlaces glucosídicos de la hemicelulosa y zonas amorfas sin modificar las zonas cristalinas de la celulosa por lo que es mayormente empleado para obtener nano cristales de celulosa (CNC) (Sadare & et. al, 2022). Dependiendo de la concentración empleada, siendo de bajas o diluidas en in rango de 0.5 a 8% p/p, y concentradas del 40 al 70% p/p se puede hidrolizar únicamente la celulosa hemicelulosa o junto con la celulosa liberando azúcares que se pueden usar para producir bioetanol como la xilosa, o monoméricos en el caso de los concentrados para obtener CNC's (Farias, Labidi, & et. al, 2024).

### Tratamientos enzimáticos

Avances recientes para procesos de hidrólisis que permiten reducir costos y mejorar la eficiencia de procesos de extracción de diferentes bioproductos es por medio del uso selectivo de enzimas, bacterias, hongos, entre otros. En el caso de la extracción de celulosa utiliza enzimas como celulasas que convierte la celulosa en azúcares simples catalizando los enlaces  $\beta$ -1,4-glucosídicos (Woźniak, 2025) .

### Extracción con fluidos supercríticos

Esta metodología de extracción con fluidos supercríticos trabaja mediante las propiedades de fluidos como el CO<sub>2</sub>, que es el más utilizado para este tipo de procesos, debido a que puede alcanzar el estado supercrítico de presión y temperatura funcionando con las propiedades de gas y líquido, lo que permite disolver selectivamente la lignina y hemicelulosa, aislando la celulosa sin formar compuestos inhibidores, tóxicos o contaminantes (Rasaq S. & et. al , 2024).

### Organosolv

EL proceso organosolv consiste en pretratar los materiales lignocelulósicos con disolventes orgánicos como el etanol, metanol y acetona, en presencia de un catalizador ácido para reducir temperatura y tiempo en la reacción pues promueve la dilución de la lignina y hemicelulosa, dejando como residuo la celulosa en estado sólido (Lozano et. al., 2024).

### Peroxidación

Tratamientos con peróxido de hidrógeno es un agente oxidante usado como agente blanqueador en la industria. Sin embargo, en condiciones alcalinas de pH aproximadamente de 11.5 genera radicales hidroxilos y super hidroxilo promoviendo así la oxidación selectivamente a la lignina y

una fracción de la hemicelulosa en sus enlaces ésteres y éteres. (Beevi Ummalya, 2024). Para obtener buenos resultados, no se necesitan altas concentraciones ni temperaturas altas, ya que el peróxido de hidrógeno se descompone fácilmente en agua y oxígeno (Nilanthi & et. al, 2015), siendo así una alta alternativa de bajo consumo energético, de reactivos y no contaminante.

### Arsénico: propiedades, efectos ambientales y a la salud

El arsénico ocupa el vigésimo lugar de elementos abundantes en el planeta y es catalogado como tóxico y carcinógeno entre los elementos químicos. Actualmente se encuentra presente en la atmósfera, tierra (con sus componentes) y aguas, tanto subterráneas como superficiales, provenientes de las actividades antropogénicas con niveles considerablemente altos del elemento y de su presencia de forma natural debido a la actividad biológica, emisiones volcánicas y reacciones ambientales, que representan un tercio en su presencia total en la atmósfera (Rangel Montoya, 2015). En su forma insoluble y en combinación con sulfuro y hierro no se considera tóxico, ya que su estado de oxidación y movilidad son afectados por condiciones redox y pH. Por esta razón los de estados III y V forman oxianiones en sistemas acuosos ya que son solubles y por esa razón son más tóxicos (Santini, 2000); incluso como protección, algunos organismos bacteriológicos pueden oxidarlo de III a V como mecanismo de defensa. (Macur, 2004)

El desarrollo del arsénico en sus formas tóxicas depende del estado de oxidación del elemento, tales como V, III, -III y elemental. De estos estados derivados de diferentes procesos y sectores productivos como la minería, combustión de combustibles fósiles, actividad agrícola y ganadera, el arsenito (As III) se considera 70 veces más tóxico que los demás. (Rangel Montoya, 2015). Dentro de las mismas actividades se ha identificado a la industria metalúrgica, desde su extracción como transformación de minerales y los combustibles que se usan para alcanzar y mantener temperaturas elevadas como el carbón; como las primeras fuentes de emisión contaminante. (Mukhopadhyay, 2002).

Establecido el comportamiento y origen del arsénico, podemos evidenciar que el daño a la salud humana y al medio ambiente es considerable. Ya que estos elementos o compuestos son fácilmente inhalados por su presencia en la atmósfera como material particulado, ingesta directa por alimentos o agua y absorción cutánea (Salud, 1987), De hecho, no es necesario que una persona tenga una exposición a altas o bajas concentraciones, sino del tiempo de exposición, es probable el desarrollo

de cáncer de piel (Arce, 2012), cáncer en pulmones, daños gastrointestinales, afección circulatoria y daño al sistema nervioso.

Un estudio en materia ambiental, por la misma biodisponibilidad del arsénico, se caracterizó suelo de 2 regiones en el estado de Querétaro, México; dando como resultado que la concentración de As presente en el suelo, donde se detectó que provocaba problemas de migración, en este caso, en cultivos de garbanzo (Gómez, 2013) permite llegar a una conclusión casi lógica que el daño más representativo es que su presencia en atmosfera, agua y suelo impacta por su añadidura en la cadena alimenticia, afectándonos a los humanos o consumidores de los diversos productos de la tierra y el mar.

### Arsénico y sargazo

Uno de los problemas más importantes con el uso de las algas recolectadas del mar o playas, es la posibilidad de contaminación por metales pesados como el arsénico y mercurio, ya que las algas adsorben muy bien los diferentes tipos de sustancias del medio, destacando sobre todo los metales (Motta & Rodriguez, 2020). Esta capacidad inherente de las algas se debe a que la superficie de su pared celular tiene abundantes grupos hidroxilos (-OH), carboxilos (-COOH) y aminas (NH<sub>2</sub>) que permite la captura de metales pesados y metaloides por intercambio iónico (Singh, 2022) Sin embargo, también tiene la capacidad de absorber compuestos de su medio como nitratos y fosfatos como nutrientes para su crecimiento, pero los metales que se han sido adsorbidos pueden ser metabolizados por un proceso de bioacumulación, donde se captura activamente dentro del citoplasma u orgánulos del alga (Albalasmeh, 2023).

Un estudio bromatológico realizado en 4 zonas representativas de la costa del Caribe Mexicano, en el año del 2022, reportó un promedio de 333 ppm de As teniendo un máximo de 800 ppm, 14 ppm de Cr con un máximo de 48 ppm y un máximo de 200 ppm de Ni; tomando en cuenta que hubo una gran variación entre especies, pero no en los reportes de valores significativos entre las zonas de donde se extrajeron las algas (Pereira, 2022). Aunque actualmente no existe un estándar o norma respecto a los límites máximos permisibles de arsénico o elementos traza en las algas; resulta alarmante si tomamos como un punto de referencia a la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004- “Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio , cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata,

plomo, selenio, talio y/o vanadio”, que establece 22 ppm como el Límite Máximo Permisible en suelos agrícolas y la NOM 127-SSA1-1994- “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, que establece 25 mg L<sup>-1</sup> como límite máximo permisible para agua potable. En 2006 la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), redujo el límite de concentración de arsénico en agua para beber de 50 a 10 mg L<sup>-1</sup>.

## Estado del arte

Para la separación de celulosa existe un procedimiento de “uso de un solo recipiente”, teniendo como producto nano láminas de celulosa por medio de un proceso de lavado con agua a 60°C, filtrado, secado, molido y tamizado para un tratamiento posterior con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 70°C / 1 h, luego con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en mezcla con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por otra hora para finalmente, en su estado sólido, agregar solución de NaOH para neutralizar, filtrar y secar por evaporación. (Mendoza & Terán, 2022)

En el trabajo de (Fernandez & Gerardiny, 2022) utilizaron dos especies de algas residuales para demostrar el mayor potencial de extracción de celulosa. Las especies estudiadas fueron “*Ulva papenfussi* Pham-Hoang Hö y *Rhodomenia corallina* (Bory) Greville”, obteniendo los resultados de forma descriptiva de la media de los porcentajes de celulosa igual a 17.52% y 4.19% respectivamente. Este trabajo tuvo etapas como: preacondicionamiento de las algas, pretratamiento de la muestra, desclorofilización, extraíbles orgánicos, extraíbles inorgánicos, extracción de holocelulosa, y para finalizar, las etapas de análisis cuantitativo mediante análisis de espectrofotometría infrarrojo y cualitativo mediante prueba de solubilidad.

Para la obtención de nano celulosa también se han aplicado por síntesis bacteriana, hidrólisis química, molienda mecánica, hidrólisis enzimática o combinación de estas (Mendoza, Terán, & Herrera, 2022)

Otras técnicas de extracción eficiente de los polisacáridos incluyen extracciones asistidas por microondas, ultrasonidos y enzimas, teniendo como resultado, en su mayoría, polisacáridos sulfatados en algas verdes. (Ying, Xuesonghuang, & Cheong, 2017)

Las aplicaciones del sargazo hasta la fecha son amplias, ya que por contener uno de los polisacáridos más importantes para la industria, la celulosa, sus aplicaciones van desde aditivos alimenticios, fibras dietéticas o materiales de base biológica para empaques (Mendoza & Terán, 2022), como material compósito en la fabricación de material de construcción en forma de película que puede reducir altas temperaturas en los interiores de las construcciones (Polett, Cruz, & Zavala, 2022)

La demanda creciente de biopolímeros para empaques, fibras dietéticas y, hasta como aditivos para alimentos; la nanocelulosa es un material de suma importancia y con variables propósitos. Como por ejemplo una experimentación de aislamiento de la nanocelulosa usando un alga parda,

logrando un rendimiento del 14.9% en la obtención de nanocelulosa pura en placas 2D que se aplicaron para generar películas con una transmitancia del 81%. (Chávez , Perez , & et. al, 2022)

Otro descubrimiento fue que en condiciones bajo una atmósfera y oxígeno reducido, a 400-600°C por 15 min, se forma un material altamente poroso de CaCO<sub>3</sub> que tiene buenas propiedades adsorbente, que bien pueden ser utilizadas para remover colorantes de soluciones acuosas. (Parra, Márquez, Semjonova, Serrano, & Vlasova, 2022)

En la Tabla 4 se presenta una comparación de algunas otras investigaciones enfocadas en la extracción de celulosa algal, donde se presentan métodos ácidos, alcalinos y organosolv, algunos con asistencia de ultrasonido como en la investigación de Muthukumar y Chidambaram, quienes realizaron un estudio donde asisten con ultrasonido tres métodos diferentes de extracción para evaluar la mejora en rendimiento aplicando esta tecnología en procesos tradicionales de extracción.

Tabla 4 Investigaciones enfocadas a la extracción de celulosa algal por diferentes métodos y sus productos. Elaboración propia, 2025.

Referencia	Biomasa	Método empleado	Condiciones	Productos
<b>Algae, C. (2024).</b>	Algas filamentosas verdes ( <i>Cladophora sp.</i> y <i>Microspora sp.</i> ), conocidas como Algas Kai.	Método alcalino	Método alcalino	37.2% de celulosa.
<b>Muthukumar &amp; Chidambaram (2023).</b>	Macroalgas Rojas y Pardas ( <i>Sargassum wightii</i> , <i>Turbinaria ornata</i> , <i>Gracilaria edulis</i> , <i>Gelidiella acerosa</i> , <i>Kappaphycus alvarezii</i> ).	Ultrasonido Asistido (seguido de alcalinización, neutralización y liofilización).	Tratamiento ultrasónico, alcalinización, neutralización y liofilización.	Proporcionó la máxima eficiencia de extracción de celulosa en comparación con otros métodos.
<b>Muthukumar &amp; Chidambaram (2023).</b>	Macroalgas rojas y pardas.	Aislamiento en dos pasos (Two-step isolation).	Tratamiento con ácido HCl y álcali (NaOH), seguido de dos pasos de blanqueo con KOH, NaClO, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .	Rendimiento comparativamente bajo respecto al método asistido por ultrasonido.
<b>Muthukumar &amp; Chidambaram (2023).</b>	Macroalgas rojas y pardas.	Método de holocelulosa.	Blanqueo con NaClO, seguido de tratamiento alcalino con NaOH.	Rendimiento comparativamente bajo respecto al método asistido por ultrasonido.
<b>Muthukumar &amp; Chidambaram (2023).</b>	Macroalgas rojas y pardas.	Pretratamiento con Solvente.	Pretratamiento con metanol por 24 horas a temperatura ambiente, seguido de blanqueo y tratamiento ácido.	Rendimiento comparativamente bajo respecto al método asistido por ultrasonido.
<b>Muthukumar &amp; Chidambaram (2023).</b>	Macroalgas rojas y pardas.	Tratamiento repetitivo ácido-base (BABAB).	Tratamiento repetido con álcali NaOH y ácido.	Rendimiento comparativamente bajo respecto al método asistido por ultrasonido.
<b>Singh et al. (2017).</b>	Alga marina ( <i>Gelidiella acerosa</i> ).	Hidrólisis ácida asistida por microondas (para extracción de Nanocristales de Celulosa - CNCs).	Hidrólisis ácida con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> con asistencia de microondas.	NE
<b>Wahlström et al. (2020).</b>	Macroalga verde ( <i>Ulva lactuca</i> ).	Extracción secuencial en cuatro pasos.	Cuatro pasos de tratamiento secuencial, incluyendo tratamiento ácido.	15% (p/p)

## Antecedentes

Los procesos de extracción de celulosa utilizando un proceso alcalino con peróxido de hidrógeno permiten obtener altas eficiencias de extracción como se muestra en la Tabla 5. A pesar de la matriz lignocelulósica de estudio como hojas de maíz, caña de azúcar, residuos de bambú, paja de arroz y bagazo, las condiciones empleadas de concentración de reactivos de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> son bajas en un rango desde 1% al 30%, al igual que la temperatura y tiempo. Lo que nos llevó a utilizar un promedio de estas condiciones para establecer nuestros factores y niveles en el diseño de experimentos de tipo Box Behnken por superficie de respuesta.

Tabla 5 Estudios de extracción de celulosa con peróxido de hidrógeno alcalino con diferentes biomásas. Elaboración propia, 2025.

Referencia	Matriz	Condiciones Operacionales	Resultados
<b>Fernando et al. (2015)</b>	Hojas de maíz, hojas de caña de azúcar, bagazo, paja de guinea y orujo de maíz.	Se evaluaron tres soluciones: S1 (10 ml NaOH 1.25 mol/L+1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 99%); S2 (10 ml NaOH 2.5 mol/L+0.75 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 99%); y S3 (10 ml NaOH 5 mol/L+0.5 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 99%). Seguido de tratamiento con HCl al 10%.	La extracción de celulosa fue consistentemente mayor al 80% para todas las fibras pretratadas. La Solución S2 fue la óptima para la máxima extracción de celulosa con mínima pérdida de peso. El Pasto Guinea mostró el porcentaje de celulosa más alto (87%), y el orujo de maíz el más bajo (74%).
<b>Ummalya et al. (2024)</b>	Residuos de bambú ( <i>Dendrocalamus strictus</i> ).	NaOH-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 1% p/v. por 60 min a 121 °C	Se logró la máxima eficiencia de digestibilidad de la biomasa de 83%. El contenido de celulosa aumentó del 52% al 65%. Se obtuvo una remoción de lignina del 68% y la hemicelulosa se redujo del 18.6% al 8.6%. El índice de cristalinidad (CrI) aumentó del 64% al 70.75%.
<b>Banerjee et al. (2012)</b>	Rastrojo de maíz ( <i>Corn stover</i> ), a escala de kilogramo.	0.125 g de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> por g biomasa a pH 11.5 a 22 °C por 48 h.	Rendimientos de glucosa (75%) y xilosa (71%) del máximo teórico después de la hidrólisis enzimática. El rendimiento final de etanol fue del 67% del rendimiento teórico. El proceso mostró ser fácilmente escalable y compatible con la hidrólisis enzimática y la fermentación.
<b>Banerjee et al. (2011)</b>	Rastrojo de maíz ( <i>Corn stover</i> ).	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> a 0.5 g/g biomasa a pH de 11.5. a 23 °C y presión atmosférica.	Rendimiento de glucosa monomérica (Glc) de 95% (usando una mezcla enzimática optimizada). El rendimiento de Glc y Xyl mejoró con cargas de biomasa más altas (10% a 20%).
<b>Saha &amp; Cotta (2014)</b>	Rastrojo de maíz ( <i>Corn stover</i> ).	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 2% (v/v), pH 11.5. a 35 °C, 24 h.	Remoción de lignina del 82%. Rendimiento total de azúcares fermentables de 558±12 mg/g stover, equivalente al 79.5% del rendimiento teórico.
<b>Serrano-Martínez et al. (2024)</b>	Paja de arroz (como etapa de oxidación en proceso secuencial).	30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH 11.5) a 50 °C, agitación a 400 rpm. Evaluación de 3 a 5 h.	Esta etapa crítica facilitó la descomposición de lignina a través de radicales hidroxilos (HO·), promoviendo la posterior remoción. La reducción del tiempo de oxidación a 3 h resultó en una disminución aceptable en el porcentaje de celulosa.

# Capítulo III

## Metodología

### Metodología de la investigación

La presente investigación es de tipo cuantitativo experimental transversal y longitudinal, ya que se busca por diferentes tipos de métodos analíticos en laboratorio y la revisión de la bibliografía disponible, ensayar el método con peróxido de hidrógeno alcalino para la obtención de celulosa con bajo contenido de arsénico a partir de sargazo.

### Metodología de experimentación

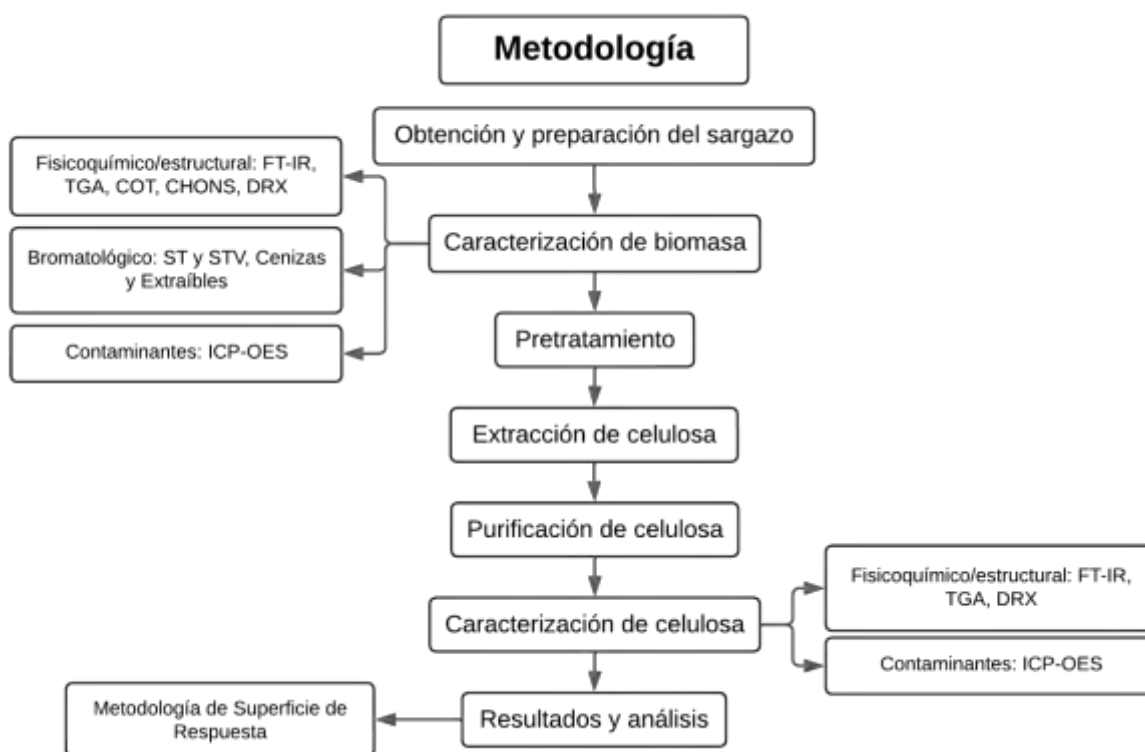


Figura 8 Mapa de flujo de metodología. Elaboración propia.

En la Figura 11 se encuentra el mapeo general del procedimiento de la metodología que se llevó a cabo por medio de un mapa de flujo que se compone de 6 etapas desde la extracción y limpieza de la biomasa con su caracterización, el pretratamiento, extracción y purificación de la celulosa obtenida y su caracterización como etapa final del proceso de extracción.

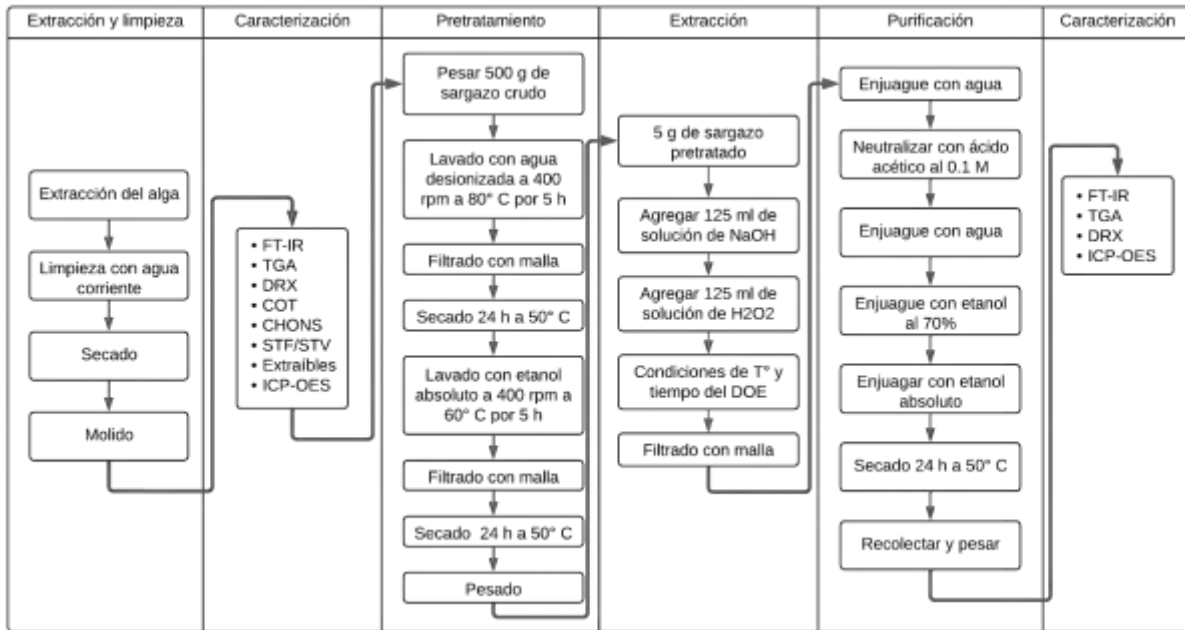


Figura 9 Mapa de flujo general de la experimentación. Elaboración propia, 2025.



con agua desionizada para remover las sales, arenas y demás componentes extras que se encontraban de manera superficial en el sargazo. Posteriormente se realizó un proceso de secado natural para eliminar la mayor cantidad de humedad para poder triturarse con molino Cyclotec CT293 y así dejar listo el material para su estudio.

## Pretratamiento

La etapa de pretratamiento del sargazo es fundamental para la remoción de componentes no celulósicos (grasas, ceras, aceites, pigmentos y azúcares) y la exposición de la celulosa, facilitando su posterior extracción. La metodología de pretratamiento se fundamentó en el procedimiento analítico NREL/TP 510-42619: “Determinación de extractivos en la biomasa”. Sin embargo, se realizaron adecuaciones del procedimiento para el procesamiento de 200 g de sargazo crudo para obtener 160 g de sargazo seco libre de extraíbles para utilizar 5 g para cada corrida con su réplica. Para eso se consideró la humedad del sargazo crudo que era del  $11\% \pm 0.6$ .

Para esta etapa primeramente se pesaron 200g de sargazo crudo y se colocaron en un vaso de precipitados de 2 L de capacidad con 1 L de agua desionizada siguiendo una relación de 1:5 p/v. Posteriormente se colocó en una plancha de termo agitación a  $80^{\circ}\text{C}$  por 5 h a un nivel de agitación 6 de la plancha y se tapó con plástico de emplayado para evitar pérdidas por evaporación. Seguido del lavado se filtró por medio de una malla, se recuperó el material sólido para secarse por 24 h en horno a  $50^{\circ}\text{C}$ .

El siguiente paso fue realizar el lavado de la biomasa con etanol absoluto 1:5 p/v a  $70^{\circ}\text{C}$  por 5 h a un nivel de agitación 6 de la plancha, tapado con emplayado plástico para evitar pérdida por evaporación, después se filtró, recuperó y secó bajos las mismas condiciones que el lavado anterior con agua.

## Extracción y cuantificación de extraíbles

El procedimiento para la cuantificación de extraíbles fue conforme al método de NREL/TP-510-42619. Donde se secaron 8 g de muestra por duplicado, secarse en horno a  $50^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Pasado el tiempo y previamente montado el equipo Soxhlet con condensador, recirculador y con los matraces a peso constante registrado, se monta el sistema completo con agua como solvente en el matraz como primera fase para procesar durante 6 h. Después del lavado con agua se secaron en el horno a  $50^{\circ}\text{C}$  por 24 h los dedales con la muestra de sargazo contenido. Una vez seco, se

procesó el siguiente lavado con etanol absoluto por 6 h y se repitió el proceso de secado de los dedos después del lavado.

Para los matraces con los líquidos contenidos de los lavados, se evaporaron y recuperaron los solventes con un equipo de condensación y se dejaron secar en el horno a 40 °C por 24 para llevarlos posteriormente a peso constante para pesar y realizar los cálculos correspondientes.

Este procedimiento utiliza dos pasos de extracción, uno para remover los elementos solubles en agua y solubles en etanol. En los que son solubles en agua, se considera material inorgánico, azúcares no estructuradas y material nitrogenado, entre otros. Para los solubles en etanol, se considera la clorofila, ceras y otros componentes en menor presencia. Esta técnica se seleccionó para la caracterización del sargazo.

## Caracterización fisicoquímica

### *Métodos y técnicas de análisis utilizados*

#### Carbón Orgánico Total (COT)

Este indicador es normalmente usado para la calidad del agua, procedente de la materia orgánica natural en descomposición y de compuestos químicos sintéticos. El COT es independiente al estado de oxidación de la materia orgánica y no responde a otros elementos orgánicamente vinculados con el nitrógeno, hidrógeno y compuestos inorgánicos que pueden contribuir a la demanda de oxígeno.

Basado en la NMX-AA-187-SCFI-2021- “Análisis de Agua- Medición de Carbono Orgánico Total en Aguas Naturales, Salinas, Residuales y Residuales Tratadas”, permite el uso de dos métodos para la medición de carbono orgánico total en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas, mediante la combustión a alta temperatura con detección IR y por colorimetría con detección UV.

El carbono inorgánico es eliminado por burbujeo de un gas inerte a una muestra previamente acidificada, posteriormente el carbono orgánico es oxidado con CO<sub>2</sub> en un tubo de cuarzo con catalizador, en el cual la muestra es calentada a una temperatura superior a 680° C o por la oxidación con persulfato y exposición a luz UV. EL CO<sub>2</sub> generado es cuantificado por un detector

infrarrojo no dispersivo, donde la cantidad de CO<sub>2</sub> es proporcional a la concentración de carbono orgánico total en la muestra.

Alternativamente, el carbono orgánico total se puede medir mediante el método colorimétrico con detección UV utilizando kits comerciales, el cual se basa en la digestión/difusión controlada de la muestra en un vial de vidrio cerrado herméticamente, donde el carbono orgánico es oxidado con persulfato de dióxido de carbono, el cual es difundido en una disolución indicadora de pH donde es convertido a ácido carbónico produciendo un cambio de color, el cual es proporcional a la concentración de carbono presente en la muestra.

$$x = \frac{y - b}{m}$$

En donde:

- y= es la respuesta del instrumento (detector IR o espectrofotómetro UV)
- m= es la pendiente de la curva de calibración
- x= es la concentración de la muestra, en mg/L de C; y
- b= es la intercepción de y (ordenada al origen)

Este método fue seleccionado para la comprensión del impacto al medio ambiente en las aguas costeras por su descomposición y cuantificar al carbono que libera.

### Sólidos Totales Fijos y Sólidos Fijos Volátiles

De acuerdo con la NMX-AA-034-SCFI-2015 “Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba”, define como Sólidos Disueltos Totales al material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada. Los Sólidos Totales Volátiles son la cantidad de materia orgánica e inorgánica que se volatiliza por el efecto de la calcinación.

Esta norma sigue un proceso general de recolectar la muestra, filtrar para separar los sólidos suspendidos, secar los sólidos filtrados en una cápsula de porcelana en un horno a 104-105°C hasta

peso constante y pesar para realizar los cálculos correspondientes como se describen en la Figura 11. Se seleccionó este análisis para la caracterización del sargazo natural con la siguiente fórmula:

$$SFT=ST-STV$$

STF: Sólidos Totales Fijos, en mg/L, ST= Sólidos totales, en mg/L y STV=Sólidos totales volátiles, en mg/L

### Composición elemental (CHONS)

Por medio de este análisis es posible determinar la cantidad de elementos particulares dentro de una molécula o material, siendo cualitativo o cuantitativo; determinando qué elementos o qué cantidad de elemento(s), respectivamente. Este análisis, dependiendo del material a analizar, es la técnica empleada; donde normalmente tiene que hacerse reaccionar antes y así obtener los resultados. En los métodos clásicos también se pueden catalogar como método gravimétrico donde se separa de la solución como un sólido como precipitado; volumétrico para determinar el volumen de una sustancia que se combina con otra con proporciones conocidas; y calorimétrico o espectroscópico que requiere la adición de un agente complejo orgánico (Barron, 2024). Este análisis lo usamos para la caracterización del sargazo crudo mediante el analizador elemental FlashSmart (Thermo Scientific) y el software EagerSmart que proporciona la composición elemental del peso en porcentaje (% p/p).

### Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR)

La mayoría de las moléculas absorben la luz en la región infrarroja del espectro electromagnético haciendo vibrar a la molécula, siendo esta absorción característica de los enlaces químicos presentes en una muestra. Esta absorción se mide en función de longitud de onda y el resultado es un espectro IR como huella individual de cada molécula con el que se puede identificar componentes orgánicos e inorgánicos. Sin embargo, el método FT-IR recoge los datos espectrales de todas las longitudes de ondas en un barrido obteniendo un interferograma que se necesita convertir en un espectro IR por Fourier para producir la representación IR más familiar de intensidad en función del número de onda (Bruker, 2024). Se seleccionó esta técnica para caracterizar el sargazo crudo seco y en la celulosa obtenida para conocer así sus cambios y comportamiento durante la fase de extracción usando un espectrofotómetro PerkinElmer Frontier.

## Análisis Termo Gravimétrico (TGA)

Es una técnica que permite el análisis cualitativo y cuantitativo de sustancias sometiéndolas a una temperatura elevada. Ayuda a evaluar cambios en la masa con respecto al cambio de temperatura.

Consiste en un equilibrio físico que contiene un crisol adecuado para soportar altas temperaturas de hasta 1000 °C o más. Antes de comenzar el análisis, el equilibrio físico se establece en una posición nula y cualquier disminución en la masa de la muestra inicial conduce a una alteración en el nivel nulo del equilibrio físico. La cantidad de corriente eléctrica utilizada para restablecer el equilibrio haciendo que la balanza vuelva a su posición nula, dependiendo del grado de reducción de masa (Rodríguez D. , 2020). Este análisis se realizó por medio de un analizador TGA modelo SDT 650

## Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

Esta técnica analítica permite cuantificar las concentraciones multielementales de metales y metaloides, reportando unidades desde partes por billón (ppb) a partes por millón (ppm). Las lecturas de esta técnica se generan a partir de la excitación de los átomos por el plasma, lo que genera una emisión de luz que dispersa un monocromador y el detector mide la intensidad en longitudes de onda que caracterizan a los elementos presentes en la muestra al regresar a su estado fundamental, siendo proporcional la concentración del elemento a la intensidad de la emisión de luz. Esta técnica fue seleccionada para poder cuantificar el arsénico presente en el alga, al término de ciertas etapas de la extracción y en la celulosa obtenida. Se utilizó el Espectrómetro de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente Perkin Elmer Modelo 2100 DV.

## Difracción de Rayos X (DRX)

La técnica de Difracción de Rayos X permite determinar la estructura atómica periódica tridimensional de sólidos cristalinos por medio de la difracción o interferencia constructiva de los rayos X con cierta longitud de onda conocida ( $\lambda$ ) que son dispersados por los átomos de la estructura cristalina permitiendo medir la intensidad de los rayos difractados en función del ángulo de difracción  $2\theta$  (Cullity, 2001). Este análisis se seleccionó para la caracterización del sargazo crudo y de la celulosa para evaluar la cristalinidad de los materiales. El equipo que se usó es un difractómetro Bruker modelo D8 Advance.

## Diseño de experimentos

El presente estudio tiene como objetivo optimizar el proceso de extracción alcalina de celulosa a partir de *Sargassum spp.*, evaluando tanto el rendimiento del producto como la reducción de arsénico total residual. Para ello, se utilizó un diseño de superficie de respuesta (RSM) tipo Box-Behnken, considerando como variables independientes la concentración de hidróxido de sodio (NaOH), la concentración de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), la temperatura del proceso y el tiempo de tratamiento. Estas variables se evaluaron en tres niveles: mínimo (-1), medio (0) y máximo (+1), como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Factores y niveles del diseño experimental.

<b>Factor</b>	<b>Nivel mínimo (-1)</b>	<b>Nivel medio (0)</b>	<b>Nivel máximo (+1)</b>
<b>Concentración 1 NaOH (%)</b>	7	18.5	30
<b>Concentración 2 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (%)</b>	8	19	30
<b>Tiempo (min)</b>	120	210	300
<b>Temperatura (°C)</b>	30	40	50

Las variables dependientes del estudio fueron el rendimiento de celulosa (%), determinado a partir de la masa de celulosa seca obtenida respecto a la biomasa inicial, y la concentración final de arsénico total (mg/kg) presente en la celulosa extraída, utilizada como criterio de calidad e inocuidad del producto. Las combinaciones específicas de los niveles de cada factor se presentan en la Tabla 5.

Cada ensayo consistió en tratar 5g de biomasa seca y tamizada de *Sargassum spp.* con una solución preparada de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ajustada según los valores de concentración, temperatura y tiempo establecidos en cada corrida (Tabla 5). Finalizado el tratamiento, la mezcla se filtró y el sólido recuperado fue lavado con agua destilada hasta pH neutro, secado a 60 °C y pesado para calcular el rendimiento de celulosa. Posteriormente, se realizó una digestión ácida de las muestras obtenidas y se determinó la concentración de arsénico total mediante espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

*Tabla 5 Combinaciones para el proceso de extracción con base al diseño experimental.*

<b>C</b>	<b>NaOH (%)</b>	<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
<b>1</b>	7	8	30	120
<b>2</b>	7	8	40	300
<b>3</b>	7	8	50	210
<b>4</b>	7	19	30	300
<b>5</b>	7	19	40	210
<b>6</b>	7	19	50	120
<b>7</b>	7	30	30	210
<b>8</b>	7	30	40	120
<b>9</b>	7	30	50	300
<b>10</b>	18.5	8	30	300
<b>11</b>	18.5	8	40	210
<b>12</b>	18.5	8	50	120
<b>13</b>	18.5	19	30	210
<b>14</b>	18.5	19	40	120
<b>15</b>	18.5	19	50	300
<b>16</b>	18.5	30	30	120
<b>17</b>	18.5	30	40	300
<b>18</b>	18.5	30	50	210
<b>19</b>	30	8	30	210
<b>20</b>	30	8	40	120
<b>21</b>	30	8	50	300
<b>22</b>	30	19	30	120
<b>23</b>	30	19	40	300
<b>24</b>	30	19	50	210
<b>25</b>	30	30	30	300
<b>26</b>	30	30	40	210
<b>27</b>	30	30	50	120

Los datos obtenidos serán analizados estadísticamente con el software de STATISTICA mediante análisis de varianza (ANOVA) por Superficie de Respuesta y regresión polinomial de segundo orden, lo que permitirá modelar el efecto individual y combinado de las variables independientes sobre las respuestas. Con base en ello, se generarán modelos predictivos y superficies de respuesta, que facilitarán la identificación de las condiciones óptimas de proceso para maximizar el rendimiento de celulosa y minimizar la concentración de arsénico residual.

## Montaje experimental

### Extracción de celulosa

Para la Fase 3 se identificaron las muestras de la celulosa obtenida con la letra “C” refiriéndose a la corrida del experimento, seguida del número de corrida con base en la Tabla 7 de combinaciones del diseño experimental que va del número 1 al 27. En los casos donde seguido de la codificación establecida tenga un “.1” significa que es la réplica de la corrida. Ejemplo C1 refiriéndose a la corrida número 1 y C1.1 refiriéndose a la réplica de la corrida número 1.

Una vez pretratado el sargazo, se procedió a la etapa de extracción de celulosa por el procesamiento alcalino bajo las condiciones especificadas en la tabla de combinaciones del diseño experimental.

Para la solución de extracción/blanqueo de cada corrida se utilizó una relación de 1:5 p/v para calcular el volumen de baño de la solución con base en los 5 g de sargazo pretratado seco para cada experimento, obteniendo 250 mL de la solución total. Para la preparación de la solución de acuerdo con las concentraciones de las combinaciones del diseño de experimentos, se utilizó una relación 1:1 v/v partiendo de las soluciones base con las concentraciones máximas de 30% para el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el NaOH, medias de 18.5% de NaOH y 19 de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, y mínimas del 7% para el NaOH y 8% para el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; según corresponda la combinación de la corrida y su réplica junto a las condiciones de tiempo y temperatura.

### Purificación

Una vez terminado el tiempo de cada experimento se filtró la muestra con una bolsa de malla para recolectar la biomasa y evitar pérdidas en los siguientes procesos. Posteriormente se enjuagó 3 veces con agua desionizada tibia y se neutralizó con un baño de ácido acético 0.1 M, después se volvió a enjuagar con agua desionizada comprobando el pH del residuo en neutro. Para finalizar se realizó un baño con etanol al 70% con agitación y después con un baño de etanol absoluto con agitación igualmente. Al término de este baño, se retiró el excedente de líquido de la bolsa de malla y se colocó a secar en una estufa por 24 h a 50° C. Pasado el tiempo, se pesó el sólido recuperado para hacer los cálculos correspondientes para obtener el rendimiento en porcentaje (%) de la reacción respecto al peso inicial del sargazo.

## Caracterizaciones y análisis de celulosa

### *Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR)*

Para el análisis de los grupos funcionales se utilizó el mismo equipo y procedimiento que para la caracterización del sargazo crudo.

### *Análisis Termogravimétrico (TGA)*

Para los análisis de estabilidad térmica se utilizó el mismo equipo y procedimiento que para la caracterización del sargazo crudo

### *Difracción de Rayos X (DRX)*

Para realizar el ensayo se utilizó un difractor de rayos X Bruker modelo D8 Advance, y para la lectura de las muestras se utilizó porta muestras de bajo fondo. Para los cálculos del Índice de Cristalinidad (CrI) se analizaron por el método de Segal con la siguiente fórmula:

$$\text{CrI}(\%) = (I_t - I_a) / I_t * 100$$

Donde  $I_t$  es la intensidad total del pico cristalino ( $I_{200}$ ) e  $I_a$  la intensidad de la zona amorfa ( $I_{am}$ )

### *Determinación de Arsénico por Espectroscopía de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)*

Para la cuantificación del arsénico, se procesaron muestras de sargazo natural y de eliminación de grasas y aceites. El sargazo seco se tamizó para obtener un tamaño de partícula  $< 2$  mm, se pesaron aproximadamente 500 mg de biomasa algal y se colocó en vasos de teflón marca Savillex con 5 ml de  $\text{HNO}_3$  de alta pureza (Fermont- trace ppb) durante 24 h de acuerdo con el método de Navarrete-Lopez (2012). La digestión se inició introduciendo los vasos de teflón, cerrados herméticamente, dentro de una autoclave marca All American modelo 75X. Se inició el calentamiento hasta obtener  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  de presión y  $125^\circ\text{C}$  y se dejó por 45 minutos (Morales-García et al., 2014). El extracto ácido obtenido se colocó en matraces volumétricos de 25 mL y se aforó con agua desionizada para proceder a la determinación de la concentración por la técnica de espectrometría óptica de emisión atómica (ICP-OES).

El estándar empleado para la preparación de la curva de calibración de arsénico CCV-1-A-250 Lote 2103303-250 marca High Purity. Para la medición de intensidades de cada punto de la curva se crea un método multielemental en el ICP-OES en donde se captura el número de estándares y

la concentración teórica de cada elemento, posteriormente cada solución es ingresada al equipo por medio del sistema de introducción de muestras el cual consta de capilar, bomba peristáltica, nebulizador, cámara ciclónica, inyector y antorcha a un flujo constante de gas argón. Finalmente se realizó el cálculo de la concentración real mediante la ecuación  $y = mX + b$ , utilizando una hoja de cálculo en Excel.

Con los datos de intensidad obtenidos por cada punto de la curva de calibración se obtuvo la ecuación de la recta:

$$Y = mX + B \dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

Donde,

- Y = Intensidad (sin unidades)
- m = Pendiente de la recta
- X = Concentración de la muestra en mg/L
- B = Ordenada al origen de la recta en mg/L

De esta ecuación se despejó X y se obtiene la siguiente ecuación:

$$X = Y - B / m \dots\dots \text{(Ecuación 2)}$$

Los valores de intensidad obtenidos para blancos y muestras se sustituyeron en el valor de Y, se restó el valor de B y el resultado obtenido se dividió entre la pendiente para obtener la concentración en  $\text{mg L}^{-1}$ . Si se aplicó alguna dilución, la concentración obtenida se multiplicó por el factor correspondiente.

A partir de la concentración en  $\text{mg L}^{-1}$  de cada muestra, se realiza el cálculo para obtener la concentración en mg/kg, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración (mg kg}^{-1}\text{)} = [\text{Concentración (mg L}^{-1}\text{)} * \text{volumen de aforo (25 ml)}] \div \text{Masa de la muestra en mg} \dots \text{(Ecuación 3)}$$

En el diagrama de la Figura 12 se muestran los parámetros y resultados en el proceso de obtención de celulosa con bajo contenido de arsénico a partir de *Sargassum spp.* El diagrama abarca desde el muestreo de la macroalga hasta la extracción de biopolímero. Inició con la recolección de 7 kg de sargazo la superficie del mar, al cual se le determinó contenido de 82% de humedad, que posterior al proceso de secado y molienda se convirtió en 1.2 kg de biomasa cruda la cual se empleó para el proceso de extracción.

Para la etapa del pretratamiento se utilizó 200 g del sargazo seco y se obtuvieron 160 g de sargazo material lignocelulósico pretratado listo para usarse en los 27 experimentos de extracción donde se usaron 5 g por cada corrida. Obteniéndose rendimientos de celulosa entre el 14 al 42 %, con un intervalo de concentración de arsénico desde no detectado hasta 29 mg kg<sup>-1</sup>.

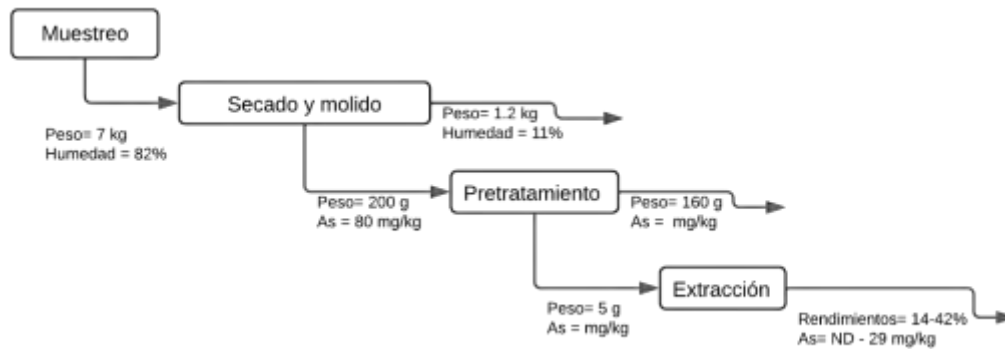


Figura 12 Diagrama de flujo del proceso general de extracción de celulosa a partir de *Sargassum spp.* ND= No Detectado. Elaboración propia, 2025.

# Capítulo IV

## Resultados y discusión

### Caracterización fisicoquímica

De acuerdo con la Tabla 6 el sargazo crudo mostró 12% de humedad, lo que sugiere una biomasa relativamente seca. Sin embargo, se observa que en la extracción de celulosa es la relación de sólidos volátiles de 55.9 %, con sólidos fijos de 44.1 %; casi la mitad del material corresponde a la fracción de cenizas. Este contenido de sólidos fijos es típico del sargazo por su alto contenido de sales y minerales como arena, carbonatos, entre otros. Con estos pueden existir dos opciones, una puede ser la dilución del rendimiento aparente de celulosa (por su alto contenido de sólidos fijos), porque una porción relevante no es lignocelulosa; y la necesidad de eliminar las sales con más lavados antes del fraccionamiento para reducir arrastre de compuestos inorgánicos que interfieren en la extracción de celulosa, esto puede conllevar a consumo excesivo de químicos y afectar directamente la pureza de la celulosa extraída.

De acuerdo con la composición elemental, el sargazo presenta carbono con 34.209%, hidrógeno con 4.6%, oxígeno con 43.29%, nitrógeno con 1.1% y azufre con 1.2%, coherente con una biomasa oxigenada donde predominan polisacáridos y grupos funcionales ricos en oxígeno. La fracción de carbono orgánico total (31.13%) confirma la presencia relevante de materia orgánica aprovechable, aunque el contraste con los sólidos fijos (44.1%) indica que una parte importante de la masa del sargazo no contribuye a la celulosa contenida en el sargazo. Además, el bajo contenido de nitrógeno (N) es favorable porque indica el bajo contenido de compuestos nitrogenados, mientras que el S (1.2 %) es un punto de atención: puede asociarse a sulfatados y compuestos que, ya que su presencia puede impactar la etapa alcalina u oxidativa y la calidad final. De acuerdo con los resultados, se observa que el sargazo crudo requiere prelavado y la eliminación de sales para maximizar el rendimiento y la pureza de la celulosa extraída.

Tabla 6 Caracterización fisicoquímica del sargazo crudo. Elaboración propia, 2025.

<b>Parámetros evaluados</b>	<b>Sargazo (%)</b>
Humedad	12
Sólidos Fijos	44.1
Sólidos Volátiles	55.9
Carbón orgánico total	31.13
Carbón Inorgánico	0.18
Carbón Total	31.31
Carbono	34.209
Hidrógeno	4.6
Oxígeno	43.29
Nitrógeno	1.1
Azufre	1.2

## Extraíbles en el sargazo

En la Tabla 7 se observa que el sargazo presenta 2.69 % de extraíbles en agua desionizada y 1.34% en etanol absoluto, es decir, aproximadamente 4.03 % de extractivos totales bajo el esquema NREL. Los resultados muestran que la presencia de la fracción de compuestos fácilmente solubles es relativamente baja, por lo que la mayor parte de la biomasa permanece como fracción estructural, donde se encuentra la celulosa, junto con otros polisacáridos y componentes de pared celular. Por lo tanto, un contenido bajo de extractivos implica menores pérdidas de masa lignocelulósica durante el acondicionamiento previo.

Además, la diferencia entre solventes es consistente con el tipo de compuestos removidos, por ejemplo, el agua suele arrastrar sales residuales, compuestos polares y moléculas de bajo peso molecular, mientras que el etanol extrae preferentemente compuestos menos polares como pigmentos, lípidos y algunos fenólicos. Aunque los porcentajes no son altos, esta etapa es importante porque se eliminan las impurezas durante la extracción de celulosa y puede reducir interferencias, con la presencia de coloración, en etapas alcalinas/oxidativas posteriores.

*Tabla 7 Porcentaje de extraíbles del sargazo con base a NREL/TP-510-42619*

Solvente	Resultados
Agua desionizada	2.69%
Etanol absoluto	1.34%

## Evaluación estructural de la materia prima mediante FT-IR

El análisis por espectroscopia FT-IR permite conocer los grupos funcionales que componen al *Sargassum spp*, con el objetivo de evaluar si existe una modificación de dichos grupos por los diversos procesos por los que se somete la biomasa. Asimismo, conocer las diferencias y variaciones en intensidades que nos permitan asociar una reducción de la concentración de estos, con respecto a la celulosa, hemicelulosa y lignina, principalmente. En la Figura 13 y Tabla 8 se presenta el espectro del sargazo inicial y la asignación de sus señales, el cual fue derivado del primer proceso de limpieza, secado y molienda. Se observan diferentes bandas de grupos funcionales las cuales se mencionan a continuación tomando en cuenta valores promedio de las lecturas. Se identifica una banda en  $3281\text{ cm}^{-1}$  debida a la presencia de alcoholes (O-H), fenoles y aminas, representativas del agua y también de los puentes de hidrógeno de la celulosa, hemicelulosa y lignina. La presencia de alcanos (grupos C-H), como en azúcares, se detectan en las bandas  $2925$  y  $2857\text{ cm}^{-1}$ . De la misma manera, se identifica una señal poco inusual con posible referencia a la presencia de nitrilos en  $2186\text{ cm}^{-1}$ . La señal en  $1604\text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos carbonilos (C=O) y amidas primarias (C-O) mientras que en  $1420\text{ cm}^{-1}$  por la posible presencia de grupos carbonilo en cetonas y ácidos carboxílicos. Para el caso de los grupos característicos de grupos hidroxilo del guayacol y carbonilo en lignina, las señales se presentan en  $1233\text{ cm}^{-1}$ . Finalmente, la presencia de grupos éster en  $1026\text{ cm}^{-1}$  y posibles anillos bencénicos sustituidos en  $704$  y  $876\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente (Alvarado Flores, 2022).

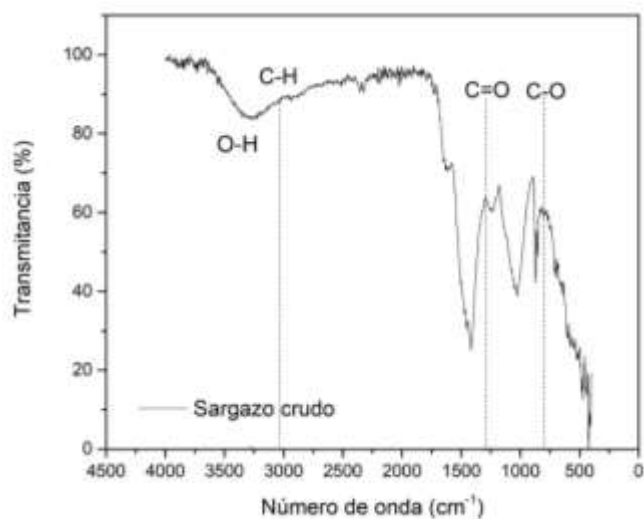


Figura 13 Espectro FTIR representativo de la materia prima, Sargazo.

Tabla 8 Asignación de grupos funcionales del Sargazo en espectro FTIR. Elaboración propia

*Banda (cm<sup>-1</sup>) Asignación de grupos funcionales*

3281	Estiramiento de grupo O-H (alcoholes y fenoles) y N-H (aminas primarias y secundarias)
2925	Estiramiento de grupo C-H $\alpha$ -anomérico y antisimétrico
2857	Estiramiento de grupo C-H $\beta$ -anomérico y simétrico
2186	Pico inusual, posible estiramiento C $\equiv$ N (nitrilos)
1604	Estiramiento CO <sub>2</sub> antisimétrico, estiramiento C=C (alquenos) y C-N con flexión N-H en amidas primarias
1420	Estiramiento de CO <sub>2</sub> (grupos carbonilo C=O en cetonas o ácidos carboxílicos) simétrico
1233	Vibración de OH en anillos de guayacol. Estiramiento en C=O en lignina
1026	Vibraciones de C-O en grupo éster en metoxilos y enlaces $\beta$ 4 en unidades de guayacol
876	Vibraciones fuera de plano del C-H en el anillo del guayacol
704	Flexión fuera del plano en C-O-H (anillos bencénicos sustituidos)

## Análisis de la estabilidad térmica del sargazo

El análisis de la estabilidad térmica del Sargazo es de gran relevancia para la determinación de sus aplicaciones finales. Dicho análisis se realiza para evaluar los cambios de las temperaturas de descomposición posterior a que los biopolímeros de hemicelulosa y lignina sean removidos. En la Figura 15, se presenta el termograma TGA de la materia prima del sargazo. Se detecta un 10% de pérdida inicial atribuido a la humedad presente y una pérdida de masa del 45% atribuida a los compuestos volátiles y la descomposición de polímeros de hemicelulosa, celulosa, proteínas y lípidos en el rango de 350 a 600 °C; 270 °C atribuido a la hemicelulosa y de 320 a 380 °C a la celulosa (Alvarado Flores, et al, 2022). Posteriormente, se presenta una pérdida de 12% referente a la transformación de residuos de carbón y parte de la lignina; dejando como residuo de 33% de carbón inorgánico (López Sosa et. Al, 2020). De la misma manera, la Figura 14 presenta la curva DTG que confirma las transiciones térmicas de descomposición del Sargazo.

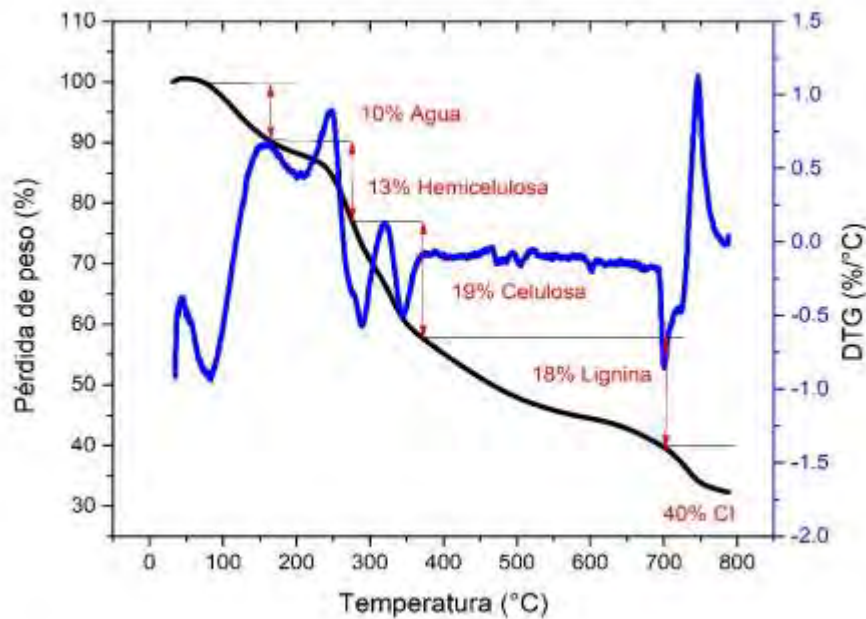


Figura 14 Termograma TGA y DTG de Sargazo crudo. Elaboración propia, 2025.

En comparación con otros estudios, por ejemplo, el de Alvarado Flores y colaboradores del año 2022, los cuales analizan también el *Sargassum spp* bajo una atmósfera inerte de N<sub>2</sub> a una velocidad de calentamiento de 40°C min<sup>-1</sup>, una pérdida de peso de 15% correspondiente a la humedad, 43% de compuestos volátiles y el resto de carbón inorgánico. En otro estudio, Ali Imtiaz *et al.*, respecto a *Sargassum spp* del Mar Rojo, reporta pérdida de humedad del 10% y un 35% de material volátil, siendo el resto la degradación de los compuestos de proteínas, holocelulosa y lignina transformada en carbón.

## Difracción de Rayos X (DRX)

En el difractograma del sargazo crudo (Figura 15) se identifican señales a  $2\theta$  aprox.  $15^\circ$ ,  $22^\circ$  y  $34^\circ$ , las cuales pueden atribuirse a celulosa tipo I, particularmente a las reflexiones características asociadas a la celulosa nativa (por ejemplo, alrededor de  $15\text{--}16^\circ$ ,  $\sim 22\text{--}23^\circ$  y  $\sim 34^\circ$ ) de acuerdo con lo reportado por Fuentes Herrera (2018). La presencia de estas reflexiones indica que, aun en estado crudo, el sargazo conserva una fracción estructural con dominios cristalinos con los planos cristalinos (111), (104), (004) propios de la celulosa, lo cual es relevante en este estudio porque confirma la presencia de polisacáridos los cuales pueden tener presencia celulosa y otros compuestos.

Por otro lado, se observan picos en el intervalo  $\sim 30\text{--}50^\circ$  ( $2\theta$ ), incluyendo señales alrededor de  $30^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $43^\circ$ ,  $46^\circ$  y  $47^\circ$ , que se asocian a la presencia de carbonatos; en particular, varios de estos ángulos han sido vinculados con calcita y, de manera complementaria, con dolomita en matrices marinas, tal como se ha descrito en la literatura (López-Sosa, 2020). Estos resultados mineralógicos son consistentes con el alto contenido de fracción inorgánica/cenizas del sargazo crudo y refuerzan la necesidad de etapas de lavado previas a la extracción de celulosa, ya que dichos minerales pueden reducir el rendimiento y afectar la pureza de la celulosa. En los resultados de la Figura 15, el patrón de DRX confirma un material complejo, con presencia de biopolímeros como la celulosa I, con presencia de mineral carbonatado, reforzando la idea de un prelavado para concentrar la fracción celulósica.

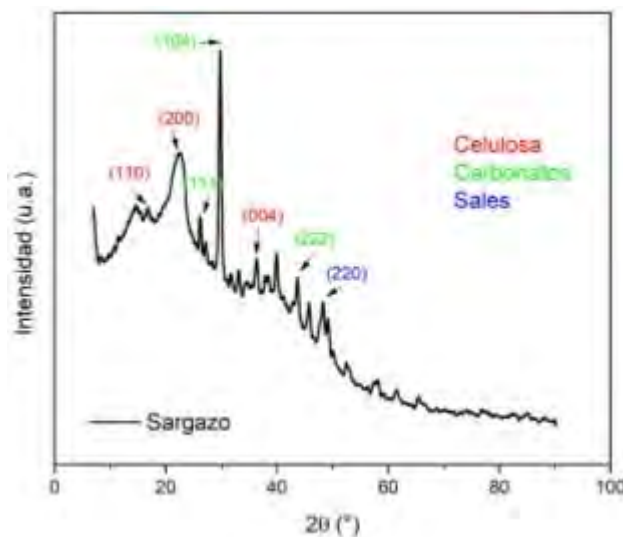


Figura 15 Difractograma de Sargazo crudo. Elaboración propia, 2025.

## Resultados de pretratamiento

Como lo menciona el reporte técnico NREL/TP-510-42619, con los lavados de agua se buscó eliminar compuestos como la sacarosa y con el etanol pigmentos, ceras, grasas o aceites que dificulten los procesos de extracción de la celulosa.

En esta fase del proceso se pesaron 200 g de sargazo crudo para el primer proceso con agua desionizada considerando la humedad promedio del material en 10.9% por medio de termobalanza. Al término del lavado, secado y pesado se registró un peso seco de 173 g. Sin embargo, se observó durante el lavado que la biomasa todavía contenía arena, por lo que el porcentaje de pérdida fue más alto de lo esperado en el análisis de determinación de extraíbles, además de las pérdidas por material fino por el proceso de filtración representando así un 15% aproximado de pérdidas en este primer proceso. Para el lavado con etanol, secado y pesado se obtuvo una recuperación de 155 g en peso seco de sargazo para su posterior uso en el proceso de extracción y que al igual que el proceso anterior, aún presentaba arena y pérdidas por la filtración siendo el 10% aproximadamente de pérdidas; siendo en total un 25% del proceso de pretratamiento.

## Resultados obtención de celulosa

En la Tabla 9 se observa que, el rendimiento de obtención de celulosa varió de 14 a 42%, mostrando una interacción fuerte entre el NaOH, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la temperatura y el tiempo. Los mayores rendimientos se observaron en 42%, que se alcanzaron bajo condiciones relativamente suaves, con 7 % de NaOH combinado con 8% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 40 °C por 300 min (corrida 2), y también con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 19% tanto a 30 °C por 300 min (corrida 4) a 50 °C por 120 min (corrida 6). Esto sugiere que una alcalinidad moderada es suficiente para solubilizar componentes no celulósicos y favorecer el enriquecimiento de la fracción celulósica, mientras que el peróxido ayuda a remover los pigmentos.

En contraste, el mínimo rendimiento (14%) se presentó en la corrida 21 con NaOH 30%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 8%, 50 °C, 300 min, mostrando que condiciones altas, con mayor concentración de NaOH alta temperatura y tiempo prolongados, pueden provocar pérdidas de celulosa por degradación y solubilización, por mayor un ataque oxidativo indirecto, reduciendo la celulosa recuperada. De forma consistente, al aumentar NaOH de 18.5 a 30 % el rendimiento tiende a disolverse y en varios casos disminuye, por ejemplo, corrida 15 con NaOH 18.5% y 50 °C por 300 min y un rendimiento

de 22%, observando que el proceso no mejora aumentando las condiciones, contrario a las corridas como la 21 donde se remuevan impurezas sin degradar la fracción celulósica.

*Tabla 9 Rendimientos por corrida. Elaboración propia, 2025.*

<b>Corrida</b>	<b>NaOH (%)</b>	<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Rendimiento reacción (%)</b>
<b>1</b>	7	8	30	120	<b>31</b>
<b>2</b>	7	8	40	300	<b>42</b>
<b>3</b>	7	8	50	210	<b>36</b>
<b>4</b>	7	19	30	300	<b>42</b>
<b>5</b>	7	19	40	210	<b>35</b>
<b>6</b>	7	19	50	120	<b>42</b>
<b>7</b>	7	30	30	210	<b>40</b>
<b>8</b>	7	30	40	120	<b>40</b>
<b>9</b>	7	30	50	300	<b>35</b>
<b>10</b>	18.5	8	30	300	<b>30</b>
<b>11</b>	18.5	8	40	210	<b>32</b>
<b>12</b>	18.5	8	50	120	<b>26</b>
<b>13</b>	18.5	19	30	210	<b>36</b>
<b>14</b>	18.5	19	40	120	<b>35</b>
<b>15</b>	18.5	19	50	300	<b>22</b>
<b>16</b>	18.5	30	30	120	<b>41</b>
<b>17</b>	18.5	30	40	300	<b>38</b>
<b>18</b>	18.5	30	50	210	<b>31</b>
<b>19</b>	30	8	30	210	<b>35</b>
<b>20</b>	30	8	40	120	<b>29</b>
<b>21</b>	30	8	50	300	<b>14</b>
<b>22</b>	30	19	30	120	<b>36</b>
<b>23</b>	30	19	40	300	<b>24</b>
<b>24</b>	30	19	50	210	<b>26</b>
<b>25</b>	30	30	30	300	<b>40</b>
<b>26</b>	30	30	40	210	<b>30</b>
<b>27</b>	30	30	50	120	<b>33</b>

En la Figura 16 se presentan las fotografías de las 27 muestras donde la primera fila corresponde al nivel mínimo del factor de NaOH, la segunda el nivel medio y finalmente la tercera correspondiente al nivel máximo. Las columnas son respecto a los niveles del factor de concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, siendo la primera el nivel mínimo, la segunda el nivel medio y tercera el máximo. Entre los grupos por cada fotografía, la variación es respecto a los tiempos y temperaturas. Aunque el alcance de esta investigación no incluye el análisis respecto a nivel de blancura de la celulosa obtenida, se aprecia en las imágenes que, las corridas en donde el nivel del factor de temperatura fue el máximo de 50° C (C3, C9, C12, C15, C18, C21 y C24) son visualmente más claras que sus adjuntos, exceptuando el caso de C5 y C26 donde las temperaturas fueron de 40° C. Entre todas las muestras, visualmente se aprecia que la corrida 15 destaca como la más blanqueada, por lo tanto, sugiere que en condiciones de NaOH al 18.5%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 19% a 50° C por 300 min se puede obtener el mejor blanqueamiento de la celulosa obtenida.



Figura 16 Muestras de producto de la reacción, corridas 1 a 27. Elaboración propia, 2025.

## Resultados de caracterización de la celulosa obtenida

### FT-IR

El análisis espectroscópico por FT-IR en la Figura 17 se muestran las diferencias significativas entre la celulosa microcristalina en polvo marca Sigma-Adrich de grado reactivo como referencia y las muestras tratadas C4 y C6 que fueron las de mayor rendimiento (C4 con NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 19% a 30° C por 5 h y C6 con NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 19% a 50° C por 2 h) y C21 (NaOH al 30%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 8% a 50° C por 5 h) que fue la de menor rendimiento; especialmente en tres bandas asociadas a la presencia de celulosa y la Tabla 10 donde se asignan sus bandas. Como se observa en la Figura 17, la primera se localiza alrededor de 3300 cm<sup>-1</sup>, correspondiente al estiramiento de los grupos O–H; esta banda es más intensa y definida en C4 y C6 en comparación con C21 y la celulosa microcristalina, lo que indica un mayor contenido de grupos hidroxilo propios de polisacáridos estructurales. La segunda banda, ubicada cerca de 2900 cm<sup>-1</sup>, está relacionada con los enlaces C–H de grupos metilo y metileno, típicos de la cadena celulósica; su presencia clara en ambas muestras tratadas confirma la preservación de la estructura alifática de la celulosa tras el tratamiento. Finalmente, en la región de 1050 a 1020 cm<sup>-1</sup>, se observa una banda intensa correspondiente a los enlaces C–O–C del anillo glucopiranosico, siendo particularmente pronunciada en la muestra C6, lo que sugiere un mayor grado de purificación o concentración de celulosa en esta muestra en comparación con C4 y 21. Por lo tanto, se observa que a comparación del estándar de celulosa respecto a su organización estructural cristalina con las muestras obtenidas en los picos de 1051 y 1023 cm<sup>-1</sup> se observan similitudes exceptuando en C21 sugiriendo existe mayor contenido de compuestos amorfos en esta muestra, además que en las corridas 4 y 6 tienen un ordenamiento más cristalino destacando C6. Estos resultados confirman la eficacia del tratamiento alcalino en la remoción de componentes no celulósicos y la obtención de una fracción rica en celulosa, que concuerda con las condiciones de NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 19% a 50° C por 2 h del ensayo 6 de la matriz experimental.

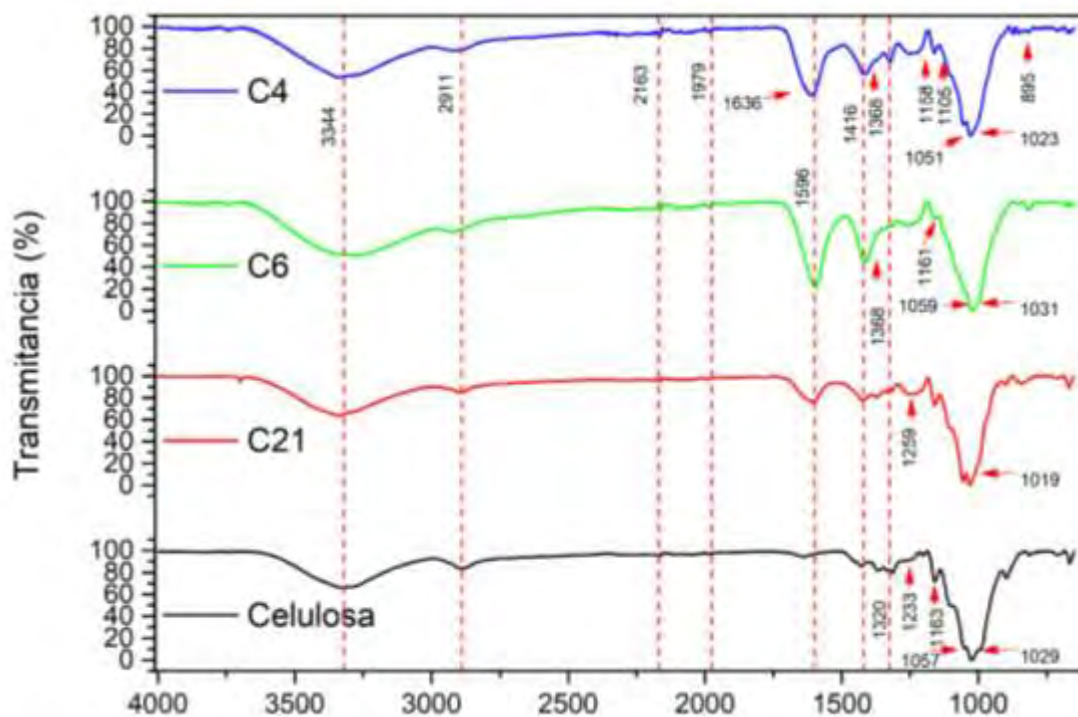


Figura 17 Espectros FT-IR de celulosa grado reactivo, corridas 4, 6 y 21. Elaboración propia, 2025.

Tabla 10 Asignación de bandas en muestras C4, C6, C21 y celulosa microstalina estándar. Elaboración propia, 2025.

Número de banda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Asignación de grupos funcionales	Compuesto
3344	Estiramiento O-H (puentes de hidrógeno)	Celulosa, Hemicelulosa, Lignina
2911	Estiramiento C-H (grupos metilo y metileno)	Celulosa, Hemicelulosa, Lignina
2163	Estiramiento del enlace en el monóxido de carbono (CO)	Subproducto gaseoso
1979	Vibraciones de trazas o ruido de línea base	Trazas en pulpa de papel/celulosa
1636	Flexión O-H del agua adsorbida	Celulosa purificada
1596	Estiramiento del anillo aromático (C=C)	Lignina
1416	Deformación simétrica de $-\text{CH}_2$ (tijereteo)	Celulosa (región cristalina)
1320	Vibración de balanceo de $-\text{CH}_2$	Celulosa
1368	Deformación simétrica del grupo $-\text{CH}_3$ o flexión C-H	Celulosa y Hemicelulosa
1233	Estiramiento C-O-C (éster arilo-alquilo) o acetilos	Hemicelulosa y Lignina
1259	Vibración asimétrica S=O (éster de sulfato) o C-O-C	Nanocristales (CNCs) / Lignina
1059	Estiramiento C-O o deformación C-OH	Celulosa
1033	Estiramiento C-O-C del anillo de piranosa	Celulosa (esqueleto del anillo)
895	Flexión de enlaces $\beta$ -glicosídicos (C-H)	Celulosa (Allomorfo I y II)

## TGA

En la Figura 18 se muestra los termogramas (lado izquierdo) y la derivada termogravimétrica (lado derecho) de los productos de la extracción de celulosa correspondientes a las corridas 1, 4, 6, 15, 21, 23 y 27 como muestras representativas de los niveles de los factores del diseño experimental desde el nivel mínimo hasta el máximo y celulosa microcristalina en polvo marca Sigma-Adrich.

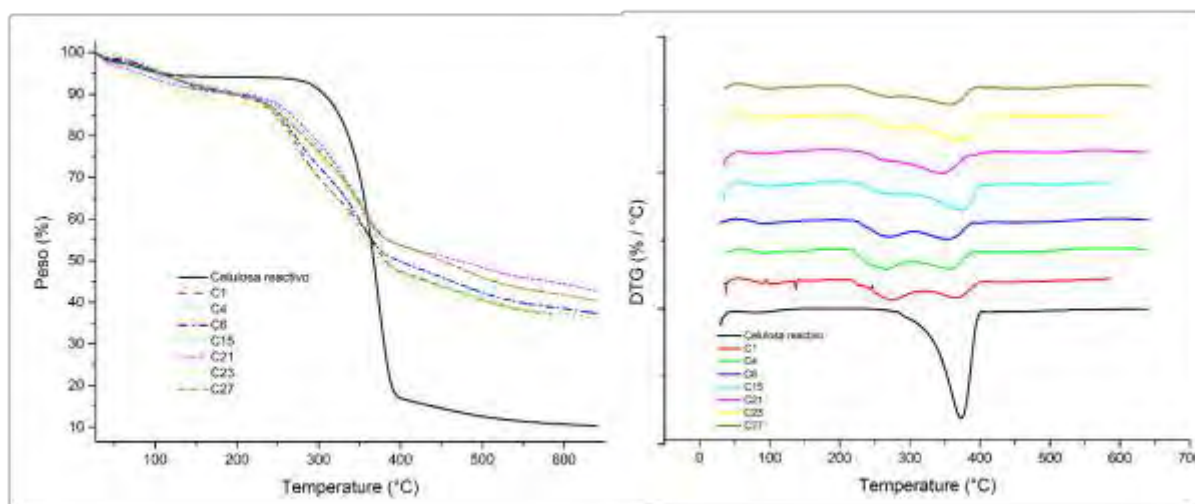


Figura 18 Termograma de productos de la extracción. a) TGA (izquierda), b) DTG (derecha). Elaboración propia, 2025.

En tales gráficas podemos confirmar que el proceso de extracción fue exitoso ya que como se menciona en la literatura, la zona de degradación de la celulosa se encuentra entre los 250 y 400°C, siendo visualmente indicativo en la gráfica del DTG que es el intervalo donde registra su presencia en las muestras analizadas.

En la gráfica de TGA podemos observar que hubo ligeras variaciones en la zona de 350 a 400° C para C21 y C27 respecto a comportamiento de la degradación de los diferentes compuestos como humedad, hemicelulosa, celulosa, lignina y carbono inorgánico. C21 (línea fucsia) con factores NaOH al 30%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 8%, tiempo de 300 min a 50° C fue la muestra que presentó el menor rendimiento de la extracción con un 14%, y C27 (línea naranja) fue la corrida en los niveles máximos de los cuatro factores (NaOH al 30%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30%, tiempo de 300 min a 50° C) que presentó un rendimiento del 33%, que correspondientes a los DTG de la gráfica de la derecha podemos observar que en el rango de 250 a 300° C no presenta un pico tan pronunciado como el resto de las muestras. Esto se debe a que esta es la zona donde la celulosa amorfa se comienza a degradar, dándonos referencia a que, debido a las altas concentraciones del hidróxido de sodio y

alta temperatura, la fracción amorfa de la celulosa fue removida durante el proceso de extracción. Respecto al resto de las muestras podemos observar en la gráfica de DTG, que muestran proporciones en celulosa cristalina y amorfa muy aproximadas una de otra destacando C1, C4 y C6 donde las últimas dos fueron las que presentaron el mayor rendimiento del proceso de extracción. Describiendo lo anterior podemos observar cómo al aumento de las concentraciones es mayor la remoción de la zona amorfa de celulosa.

Asimismo, las gráficas de DTG de forma general muestran los cambios significativos en el rango de temperatura entre 250 y 300° que, en concentraciones medias de los reactivos, tiempos y temperaturas altas, la zona cristalina se desarrolla mejor como se observa en C15 que muestra el pico más prominente de entre el resto de las muestras en dicho rango de temperatura, siendo sus condiciones de NaOH al 18.5%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 19% a 50° C por 300 min.

En la Tabla 11 se muestra la correlación de la proporción de celulosa respecto al rendimiento de los productos de extracción y el peso de la celulosa calculada con base de 5g se sargazo utilizado para la extracción.

*Tabla 11 Comparación de porcentajes de rendimiento de la extracción con su aproximación de celulosa pura en las muestras. Elaboración propia, 2025.*

<b>Muestra</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Celulosa</b>	<b>Peso de celulosa (g)</b>
<b>Sargazo crudo</b>	<b>NA</b>	<b>19%</b>	<b>0.95</b>
<b>C1</b>	31%	39%	0.6045
<b>C4</b>	42%	40%	0.84
<b>C5</b>	35%	36%	0.63
<b>C6</b>	42%	37%	0.777
<b>C9</b>	35%	39%	0.6825
<b>C10</b>	30%	40%	0.6
<b>C13</b>	36%	39%	0.702
<b>C14</b>	35%	32%	0.56
<b>C15</b>	22%	42%	0.462
<b>C17</b>	38%	37%	0.703
<b>C18</b>	31%	35%	0.5425
<b>C21</b>	14%	34%	0.238
<b>C23</b>	24%	39%	0.468
<b>C25</b>	40%	32%	0.64
<b>C26</b>	30%	34%	0.51
<b>C27</b>	33%	34%	0.561

## DRX

En la Figura 19 se observa que, independientemente de la condición (C1–C27), los productos conservan señales asociadas a la celulosa tipo I, principalmente alrededor de  $2\theta \approx 15\text{--}16^\circ$  y  $22\text{--}23^\circ$ , lo que confirma que el sólido recuperado mantiene una fracción celulósica estructural tras el tratamiento. Sin embargo, la definición y el ensanchamiento de estas reflexiones cambian entre corridas, patrones con picos más marcados y un fondo menos irregular como es el caso de la corrida C1 (NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 8% a 30° C por 120 min.) y C7 (NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% a 30° C por 210 min.) sugieren un material con mayor presencia de celulosa y mayor proporción de fase orgánica estructurada, mientras que el incremento de ondulaciones y picos secundarios entre  $\sim 30\text{--}50^\circ$  indica presencia variable de fases inorgánicas residuales (sales/carbonatos) que no se eliminan completamente en todas las condiciones.

La diferencia más clara aparece en las condiciones de mayor severidad, por ejemplo, en C21 (NaOH al 30%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 8% a 50° C por 300 min.) la corrida de menor rendimiento presentada en la Tabla 9; muestra el patrón con una contribución relativamente más evidente de señales secundarias en el rango  $30\text{--}50^\circ$ , lo que es consistente con un escenario donde la fracción orgánica/celulósica se pierde o se degrada y, en consecuencia, la señal de minerales se vuelve más “visible” en el difractograma del sólido final. Por otro lado, en la corrida C27 (NaOH al 30%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% a 50° C por 120 min.) presenta picos más suaves, que puede interpretarse como reducción de cristalinidad o mayor fracción amorfa por efecto combinado de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; esto es importante debido a que muestra que aumentar la severidad de la extracción no necesariamente mejora la calidad, pudiendo desordenar la celulosa con baja cristalinidad o favorecer arrastre de compuestos inorgánicos, por lo que el mejor desempeño se asocia a un balance entre remoción de impurezas y conservación de la estructura celulósica.

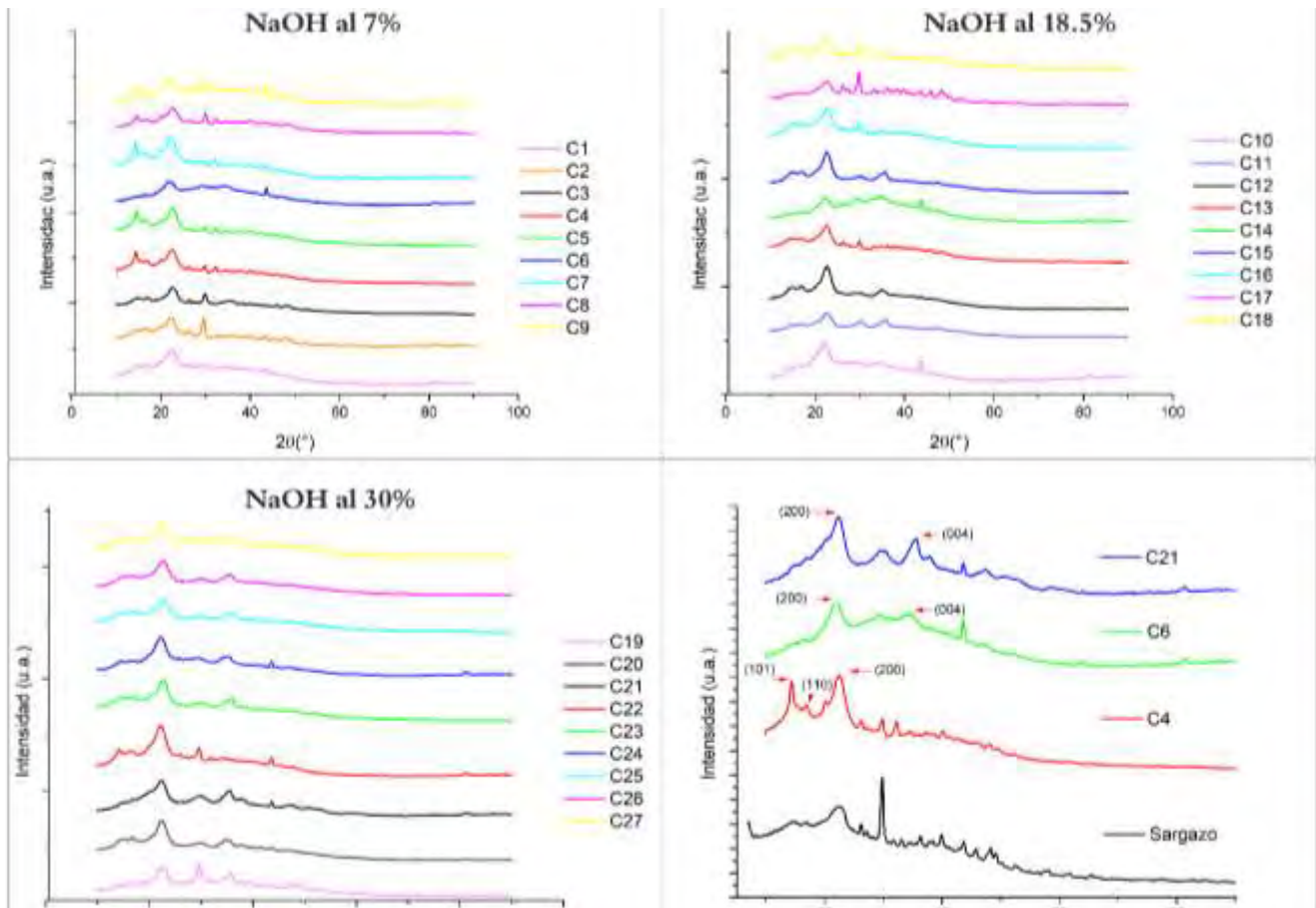


Figura 19 Comparación de grupos de patrones de DRX de productos de la extracción. a) NaOH al 7%, b) NaOH al 18.5%, c) NaOH al 30% y c) Máximos vs mínimo vs sargazo. Elaboración propia, 2025.

Como se ha mencionado, la celulosa de tipo I, es considerada celulosa nativa en materiales lignocelulósicos. Esta se caracteriza por los picos de difracción  $15-16^\circ$ ,  $22.5^\circ$  en  $2\theta$  con sus planos cristalográficos de (110), (1-10) y (200) respectivamente. Sin embargo, la intensidad en el pico en  $22.5^\circ$  de  $2\theta$  sugiere una mayor transformación de la celulosa de tipo I a tipo II por la disolución y recristalización inducida por el álcali, y su plano en (200) es el plano principal del empaquetamiento laminar. Esto se debe a la capacidad del NaOH de romper los enlaces intra e intermoleculares favoreciendo el reordenamiento de las cadenas poliméricas en nuevas estructuras cristalinas (Alba N. & et. al, 2024). También podemos observar en el mismo ángulo un ancho que nos da indicio de la cristalinidad de la celulosa, no obstante, en el ángulo de  $21^\circ$  muestra la presencia de zonas amorfas como es el caso de C4, C5 y de C7 a C9 con más claridad que el resto de los experimentos

Los ángulos de  $26.26^\circ$  y  $29.5^\circ$  corresponden al carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), con los planos (111) y (104) respectivamente. El  $\text{CaCO}_3$  es común en las algas, no obstante, después del proceso de la extracción se puede observar que sigue presente en las muestras como parte de la región amorfa del producto de la reacción. Estos picos se observan más definidos en las corridas 2, 3, 8, 9 y 16-19 donde comparten condiciones altas de peróxido de hidrógeno (30%) en el caso del rango de C8, C9 y C16 a C18; y temperaturas y tiempos de niveles medios y altos en todos los casos, sugiriendo que las concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  sean mayores a las  $\text{NaOH}$  a temperaturas de  $40\text{-}50^\circ\text{C}$  permiten conservar las estructuras amorfas en la celulosa.

En la gráfica de la subfigura c se muestran los patrones de las corridas de C4 y C6 que presentaron el máximo rendimiento de la reacción con 42%, C21 que fue el mínimo con 14% y el sargazo crudo. Esta gráfica nos permite observar los cambios cristalinos sobre el alga, donde a pesar de que C4 y C6 presentaron los máximos rendimientos, se observa que C4 posee más zonas amorfas en su estructura. Así mismo a comparación de C21, C6 muestra menos picos correspondientes a sales y carbonatos.

En la Tabla 12 se muestran los índices de cristalinidad de los productos de la extracción, calculado con la ecuación de Segal donde se utiliza el pico cristalino en  $2\theta$  para su cálculo donde es la intensidad total del pico cristalino y la intensidad de la zona amorfa. En la tabla encontramos que la corrida con menor cristalinidad es C16 con un 50.46% y el mayor de 72.16% en C3, indicando que la celulosa obtenida es de estructura semicristalina.

En comparación con la cristalinidad de la celulosa en el sargazo que es del 35% calculada con el método de Segal igualmente, nos muestra que el tratamiento alcalino oxidativo permitió un incremento de la cristalinidad entre un 15 al 37%. En un estudio morfológico y de cristalinidad de nanofibras de celulosa partir de *Sargassum sp.* de Nurhayati (2025), reporta una cristalinidad del 32% para la celulosa en el sargazo y después de 3 tratamientos con carbonato de calcio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) al 2%, seguido de un lavado con sosa al 6% (1:20 p/v) a  $80^\circ\text{C}$  por 2 h para finalmente un blanqueamiento con hipoclorito de sodio ( $\text{NaOCl}$ ) obtiene un 59.17% de cristalinidad. Por lo tanto, se confirma que los tratamientos alcalinos ayudan a la disolución de los compuestos amorfos como lignina y hemicelulosa, con la diferencia que el método empleado para esta investigación supera el índice de cristalino en la celulosa, además de implementar menos pasos, reactivos y tiempo.

Tabla 12 índice cristalino de Segal de los productos de la extracción respecto al ángulo  $2\theta$ . Elaboración propia, 2025.

<b>Corrida</b>	<b>Cr I</b>	<b><math>2\theta</math></b>
<b>1</b>	53.666	22.449
<b>2</b>	53.272	22.449
<b>3</b>	72.163	22.509
<b>4</b>	54.245	22.367
<b>5</b>	54.276	22.631
<b>6</b>	65.147	22.185
<b>7</b>	54.504	22.388
<b>8</b>	63.158	22.814
<b>9</b>	66.885	22.367
<b>10</b>	64.286	22.205
<b>11</b>	66.37	22.651
<b>12</b>	61.405	22.611
<b>13</b>	53.455	22.469
<b>14</b>	63.652	22.104
<b>15</b>	66.91	22.59
<b>16</b>	50.461	22.672
<b>17</b>	63.043	22.449
<b>18</b>	59.815	22.996
<b>19</b>	67.513	22.773
<b>20</b>	58.816	22.469
<b>21</b>	55.297	22.509
<b>22</b>	56.932	22.226
<b>23</b>	60.351	22.631
<b>24</b>	66.388	22.104
<b>25</b>	56.361	22.793
<b>26</b>	60.145	22.814
<b>27</b>	55.606	22.692

## Determinación de Arsénico por Espectroscopía de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

La Tabla 13 reporta las concentraciones de arsénico residual después del proceso de extracción alcalino para cada una de las corridas experimentales, donde se puede observar lecturas de concentración desde no detectado hasta 29.17 mg kg<sup>-1</sup>. Dentro de este rango las corridas experimentales 2 y 3 mostraron la mayor concentración después el procedimiento de extracción con valores de 29.17 y 22.80 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente; mientras que los registros mínimos fueron de las corridas 7 y 12 con una concentración no detectada. Con respecto al resto de las muestras se obtuvo concentración un promedio de 5.38 mg kg<sup>-1</sup> lo que sugiere que el proceso con condiciones como las de C7 con NaOH al 7% y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% a 30° C por 3.5 h o como C12 con NaOH al 18.5% y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 8% a 50° C por 2 h pueden eliminar el arsénico del producto de la extracción. Sumado a esto se encontró que a excepción de C2 y C3, las demás combinaciones reducen la concentración de arsénico en un 93% aproximadamente, considerando una concentración inicial de 82 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla 12). Adicionalmente, debido a que no se cuenta con un estándar de concentraciones máximas en algas marinas, se utilizaron normas de referencia que marcan un límite máximo permisible de 22 ppm en la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 para arsénico en suelos agrícolas, y 25 mg L<sup>-1</sup> en la NOM-127-SSA1-1994 para agua potable. Por lo tanto, se observa que la concentración reducida después del proceso alcalino, en promedio se encuentra dentro de límites máximos permisibles, reduciendo así el riesgo de ser tóxico o altamente contaminante.

Tabla 13 Concentraciones de arsénico residual del proceso alcalino. ND= No Detectado. Elaboración propia, 2025.

<b>C</b>	<b>NaOH (%)</b>	<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Concentración As (%)</b>
<b>1</b>	7	8	30	120	<b>4.97</b>
<b>2</b>	7	8	40	300	<b>22.80</b>
<b>3</b>	7	8	50	210	<b>29.17</b>
<b>4</b>	7	19	30	300	<b>2.84</b>
<b>5</b>	7	19	40	210	<b>1.12</b>
<b>6</b>	7	19	50	120	<b>4.37</b>
<b>7</b>	7	30	30	210	<b>ND</b>
<b>8</b>	7	30	40	120	<b>6.65</b>
<b>9</b>	7	30	50	300	<b>7.5</b>
<b>10</b>	18.5	8	30	300	<b>3.42</b>
<b>11</b>	18.5	8	40	210	<b>5.68</b>
<b>12</b>	18.5	8	50	120	<b>ND</b>
<b>13</b>	18.5	19	30	210	<b>0.47</b>
<b>14</b>	18.5	19	40	120	<b>3.94</b>
<b>15</b>	18.5	19	50	300	<b>2.06</b>
<b>16</b>	18.5	30	30	120	<b>4.53</b>
<b>17</b>	18.5	30	40	300	<b>8.39</b>
<b>18</b>	18.5	30	50	210	<b>0.97</b>
<b>19</b>	30	8	30	210	<b>3.76</b>
<b>20</b>	30	8	40	120	<b>1.33</b>
<b>21</b>	30	8	50	300	<b>3.04</b>
<b>22</b>	30	19	30	120	<b>9.12</b>
<b>23</b>	30	19	40	300	<b>3.81</b>
<b>24</b>	30	19	50	210	<b>2.44</b>
<b>25</b>	30	30	30	300	<b>4.2</b>
<b>26</b>	30	30	40	210	<b>3.43</b>
<b>27</b>	30	30	50	120	<b>5.34</b>

# Análisis por superficie de respuesta

## Celulosa

Como se observa en la gráfica de Pareto de la Figura 20, muestra que los efectos significativos lineales respecto al rendimiento de la reacción son la concentración del NaOH, temperatura y concentración del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Respecto a la concentración del NaOH con un valor negativo de -3.5946 sugiere que a mayor concentración menor será el rendimiento. Para la temperatura con un valor negativo de -3.1265 sugiere que, a mayor temperatura, menor será el rendimiento. Por último, el factor de concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con valor positivo de 2.5107 sugiere que, a mayor concentración, mayor será el rendimiento.

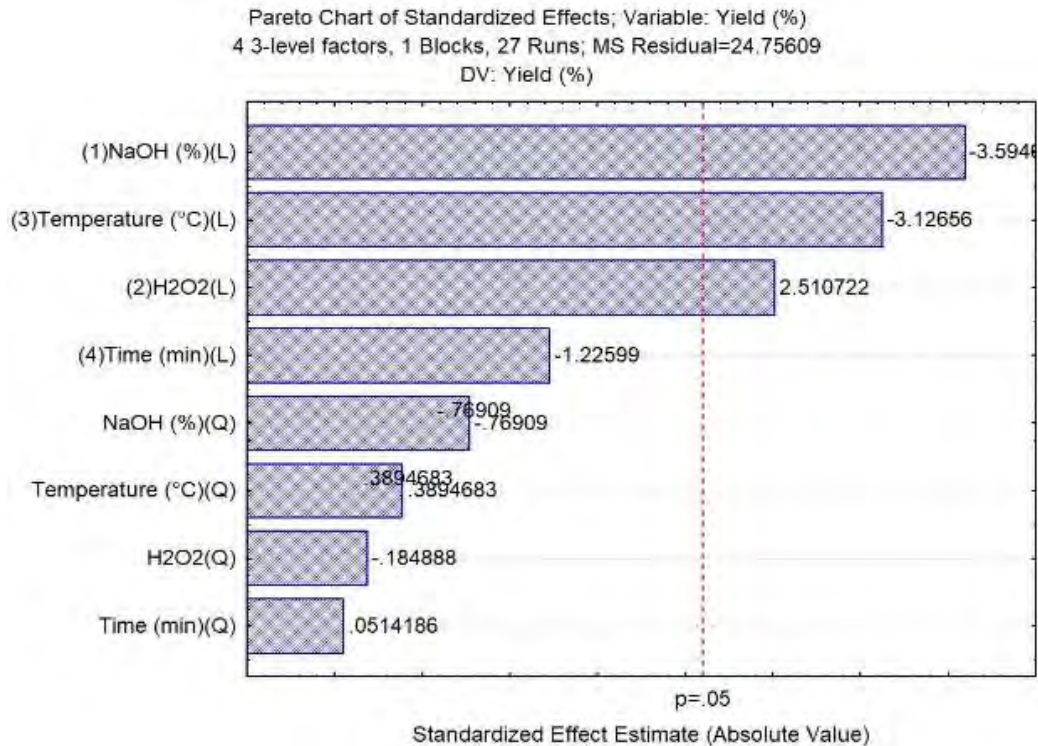


Figura 20 Diagrama de Pareto respecto al rendimiento de reacción del proceso de extracción de celulosa. Elaboración propia, 2025.

Las gráficas de la Figura 21 muestran las superficies de respuesta obtenidas a partir del modelo ajustado para la variable dependiente, rendimiento de la reacción para obtener celulosa (%), permitiendo visualizar cómo interactúan los factores evaluados en el proceso de extracción alcalina de *Sargassum spp.* Estas representaciones son fundamentales para identificar regiones de mayor rendimiento y comprender las interacciones entre las variables.

En la subfigura a, se observa que el rendimiento tiende a incrementarse al aumentar moderadamente la temperatura (hasta 40 °C) y prolongar el tiempo de tratamiento (hasta 300 min). No obstante, temperaturas elevadas combinadas con tiempos bajos muestran rendimientos inferiores, lo que sugiere que una temperatura alta sin un tiempo suficiente podría provocar una extracción incompleta o incluso degradación parcial de la celulosa. La región óptima se encuentra hacia la esquina superior derecha, confirmando la importancia del tiempo prolongado para una extracción eficiente bajo condiciones térmicas controladas.

En la subfigura b, se aprecia una interacción positiva entre el tiempo y la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, donde los mayores rendimientos se presentan cuando ambos factores se encuentran en niveles intermedios o altos. Sin embargo, concentraciones muy altas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no mejoran necesariamente el rendimiento si el tiempo de reacción es corto. Esto indica que el peróxido de hidrógeno requiere una ventana de tiempo adecuada para ejercer su efecto oxidante sin inducir degradación del material celulósico.

La subfigura c revela que el rendimiento disminuye considerablemente en condiciones donde tanto la temperatura como la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> son altas, lo cual podría deberse a una sobreoxidación del sistema que compromete la integridad de la celulosa. Los mejores resultados se encuentran en zonas de temperatura media y concentración moderada de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, lo que reafirma la necesidad de evitar condiciones extremas para preservar la estructura deseada.

En d, se muestra que combinaciones de concentraciones medias a altas de NaOH con valores moderados de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> resultan en mejores rendimientos. Una concentración excesiva de ambos puede provocar el colapso de la matriz lignocelulósica más allá de lo necesario, afectando la recuperación de celulosa. Por el contrario, concentraciones bajas de ambos agentes también son insuficientes para una extracción efectiva, evidenciando una sinergia no lineal entre ambos reactivos.

En la subfigura e, la temperatura y la concentración de NaOH muestran una interacción menos pronunciada. Sin embargo, se identifican mejores rendimientos en niveles intermedios de NaOH (cerca de 18.5%) combinados con temperaturas no mayores a 40 °C. Esto sugiere que el NaOH en exceso, junto con temperaturas elevadas, puede provocar reacciones laterales o pérdida de celulosa.

Finalmente, la subfigura f muestra que el tiempo de reacción cobra mayor relevancia en presencia de concentraciones medias de NaOH. La región de mayor rendimiento se localiza nuevamente en los cuadrantes donde el tiempo es largo y la concentración de NaOH se mantiene en niveles intermedios. A tiempos cortos, incluso con alta alcalinidad, el rendimiento es pobre.

Por lo tanto, las gráficas indican que el mayor rendimiento de celulosa se logra con tiempos de reacción prolongados (mayor que 210 min), concentraciones intermedias de NaOH (aprox. 18.5%) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (aprox. 19%), y temperaturas controladas alrededor de 40 °C. Estos hallazgos validan la selección del diseño de superficie de respuesta y resaltan la importancia de evitar condiciones extremas que podrían inducir degradación de la celulosa o reacciones no deseadas.

En la Figura 20, se muestran los gráficos de superficie de respuesta; se aprecia que el rendimiento está relacionado principalmente por la mayor concentración de NaOH y su interacción con la temperatura y tiempo. En las gráficas donde aparece NaOH (d, e y f) se observa un gradiente claro, las zonas de mayor rendimiento se concentran hacia bajas concentraciones de NaOH (aprox. 7 %), mientras que al incrementar NaOH hacia valores altos (entre 8.5–30 %) el rendimiento baja sustancialmente (14%), y estos rendimientos bajos se vuelven más marcados cuando se combinan tiempos largos o temperaturas altas. Esto es consistente con relación al sobretratamiento, donde la matriz se vuelve más susceptible a la pérdida de material recuperable, por degradación o solubilización de la fracción celulósica, en lugar de solo remover impurezas.

Respecto a la presencia del  $H_2O_2$ , las superficies (b, c y d) sugieren un efecto positivo y moderado cuando se agrega NaOH en concentraciones bajas (5-8%), porque favorece el blanqueamiento y la remoción de compuestos no deseados sin afectar la recuperación de la celulosa; sin embargo, su efecto positivo se ve disminuido cuando la alcalinidad es alta (30%). Con respecto a la temperatura y el tiempo (a) se observa que, al aumentar cualquiera de estos factores puede ayudar solo dentro de un margen aumentando la concentración de NaOH y  $H_2O_2$  de manera controlada; especialmente aumentando la concentración de NaOH, el aumento de temperatura y tiempo deja de ser favorable. En conjunto, las condiciones óptimas que muestran los contornos son con baja concentración de NaOH (7%) y una concentración media de  $H_2O_2$  entre 8–19%, con temperaturas moderadas entre 40–50 °C y tiempos moderados entre 120–300 min, que coinciden con las condiciones con los máximos rendimientos de celulosa cercana a 42 %.

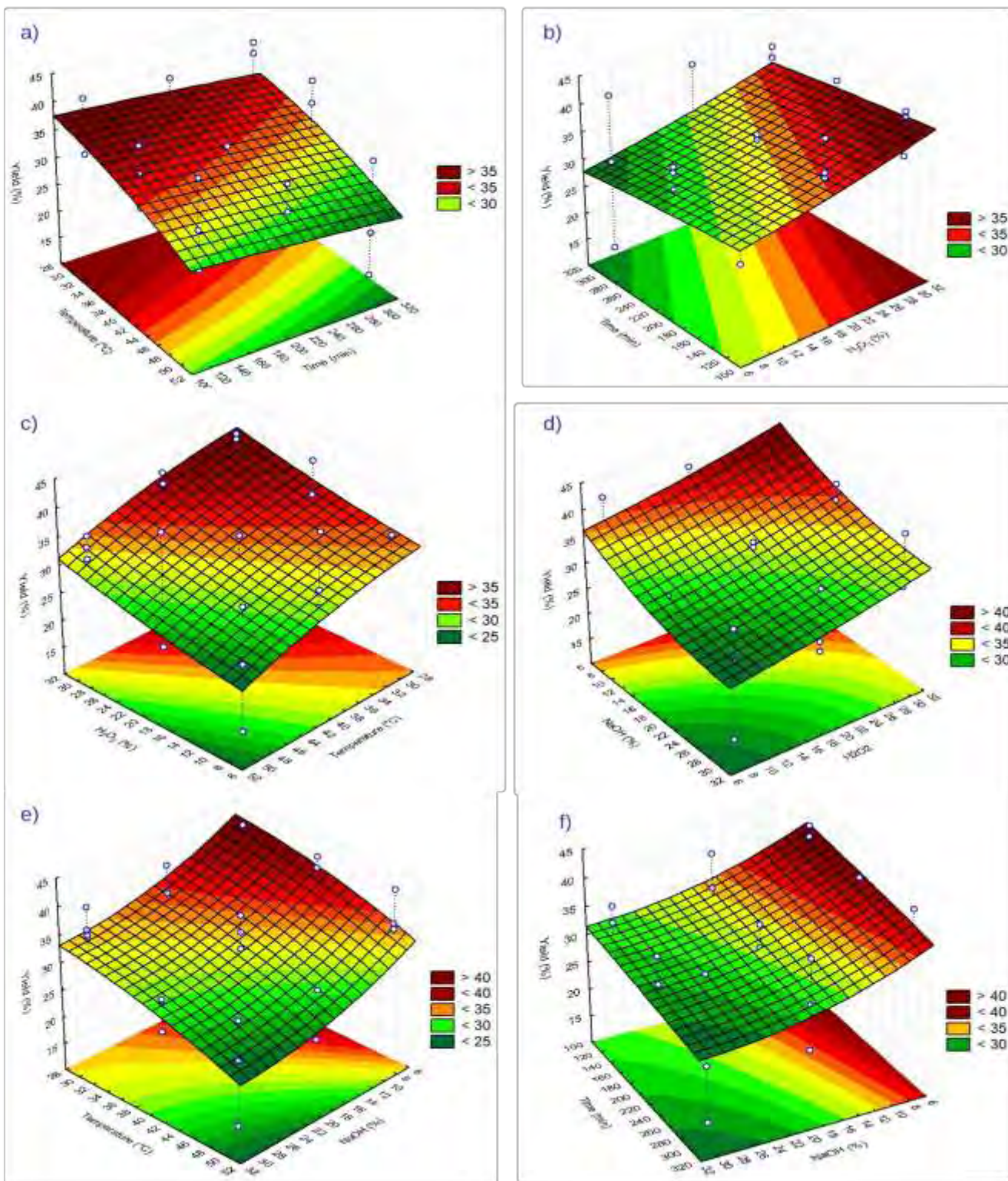


Figura 21 Gráficas de contorno sobre análisis del rendimiento de la reacción en porcentaje respecto a la influencia de los factores. a) Temperatura vs Tiempo, b) Tiempo y concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, c) Concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vs temperatura, d) Concentración de NaOH vs H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, e) Temperatura vs concentración de NaOH, f) Tiempo vs concentración de NaOH. Elaboración propia, 2025

## Arsénico

Como se observa en el diagrama de Pareto de la Figura 22, existen 3 factores que son significativos para el efecto de la mínima concentración (máxima remoción) de arsénico en la celulosa obtenida. En las primeras 3 etiquetas se muestran efectos significativos de la interacción lineal positiva de la concentración de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con la etiqueta de “1Lby2L”, la interacción lineal negativa de la concentración del NaOH con la temperatura con la etiqueta de “1Lby3L” y el efecto lineal negativo de NaOH de la etiqueta “(1)NaOH(%) (L)”.

Con lo anterior mencionado el modelo sugiere que los factores de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, y la temperatura respecto al NaOH son los factores significantes para la máxima remoción del arsénico de la celulosa, siendo que la relación de las concentraciones de los reactivos es dependiente una de otra para mejorar la remoción. Sin embargo, también observamos que el factor de mayor influencia es el NaOH, mejorando la remoción en altas concentraciones, pero reduciendo su capacidad si la temperatura aumenta.

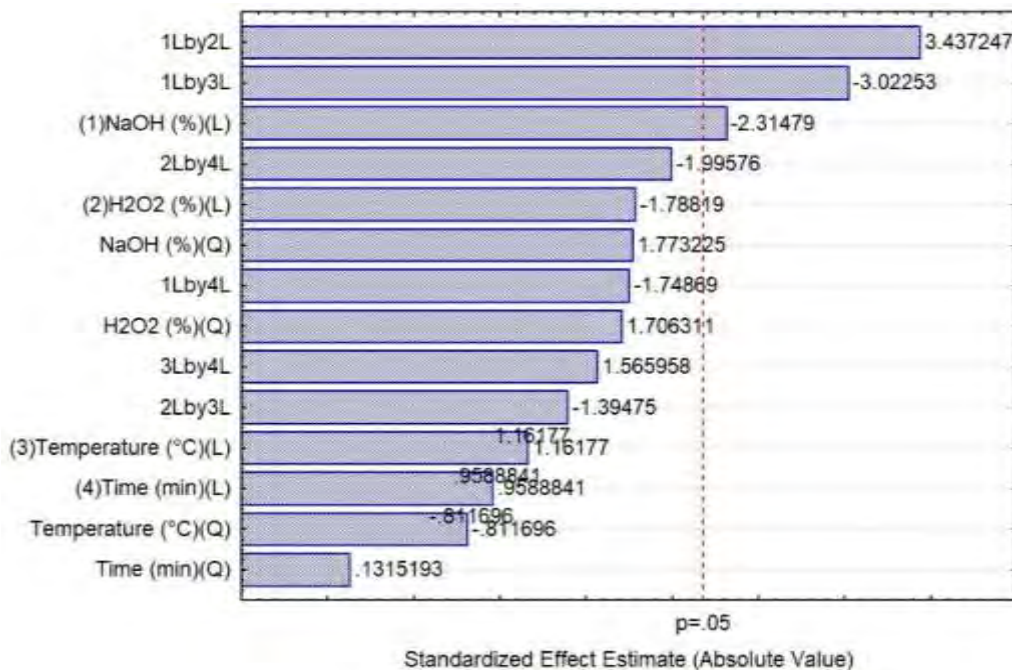


Figura 22 Diagrama de Pareto respecto a la concentración de arsénico en la celulosa obtenida. Elaboración propia, 2025.

En la Figura 23 podemos encontrar las gráficas de contorno del arsénico residual en las muestras de celulosa. En la subfigura a, muestra que la región óptima se localiza en la parte inferior central para la máxima remoción de arsénico (menor concentración de arsénico en  $\text{mg kg}^{-1}$ ) y que son significativas en concentraciones medias a altas de NaOH y  $\text{H}_2\text{O}_2$  en un rango de 17 al 27% y 14 al 25% respectivamente. También nos sugiere que en concentraciones bajas de los reactivos generan una remoción mucho menor, confirmando su interacción positiva entre ambos factores.

En b y c podemos observar las gráficas respecto a las interacciones más fuertes, como mencionamos en la interpretación del Pareto. En b, que, aunque sugiere que se tendría que hacer más experimentación para encontrar la región óptima completa respecto a la temperatura con  $\text{H}_2\text{O}_2$ , muestra que en una temperatura aproximadamente de  $28^\circ\text{C}$  y concentraciones de entre el 15 y 22% de  $\text{H}_2\text{O}_2$  se encuentra una parte de la zona de mayor remoción de arsénico.

Para la gráfica de c, siendo la interacción de la temperatura respecto al NaOH la segunda más fuerte, observamos que las condiciones de mayor remoción se encuentran en temperatura baja de  $28^\circ\text{C}$ , pero en valores medios y bajos de concentración de NaOH de entre 9 y 19%, confirmando la interacción negativa que en concentraciones bajas de la sosa y a mayor temperatura, el efecto de remoción es menor.

Por lo tanto, el análisis muestra que para obtener la mayor remoción de arsénico en el proceso de extracción se necesitan condiciones de concentraciones de aproximadamente 23% de hidróxido de sodio y 18% de peróxido de hidrógeno considerando que se necesitan condiciones bajas de temperatura. Aunque podemos observar una ligera sombra de verde oscuro en b que denota también una fracción de la zona mayor remoción en valores de mayor temperatura ( $52^\circ\text{C}$ ) en concentraciones media-alta del peróxido de hidrógeno (22-30 %), al igual que en c con temperaturas y concentraciones altas sugieren que de igual manera son parte de la zona óptima de remoción. Sin embargo, en el análisis respecto al rendimiento de celulosa, al aumento de la temperatura, el rendimiento de extracción de la celulosa es menor, sumado a que provocaría un daño a la estructura de celulosa.

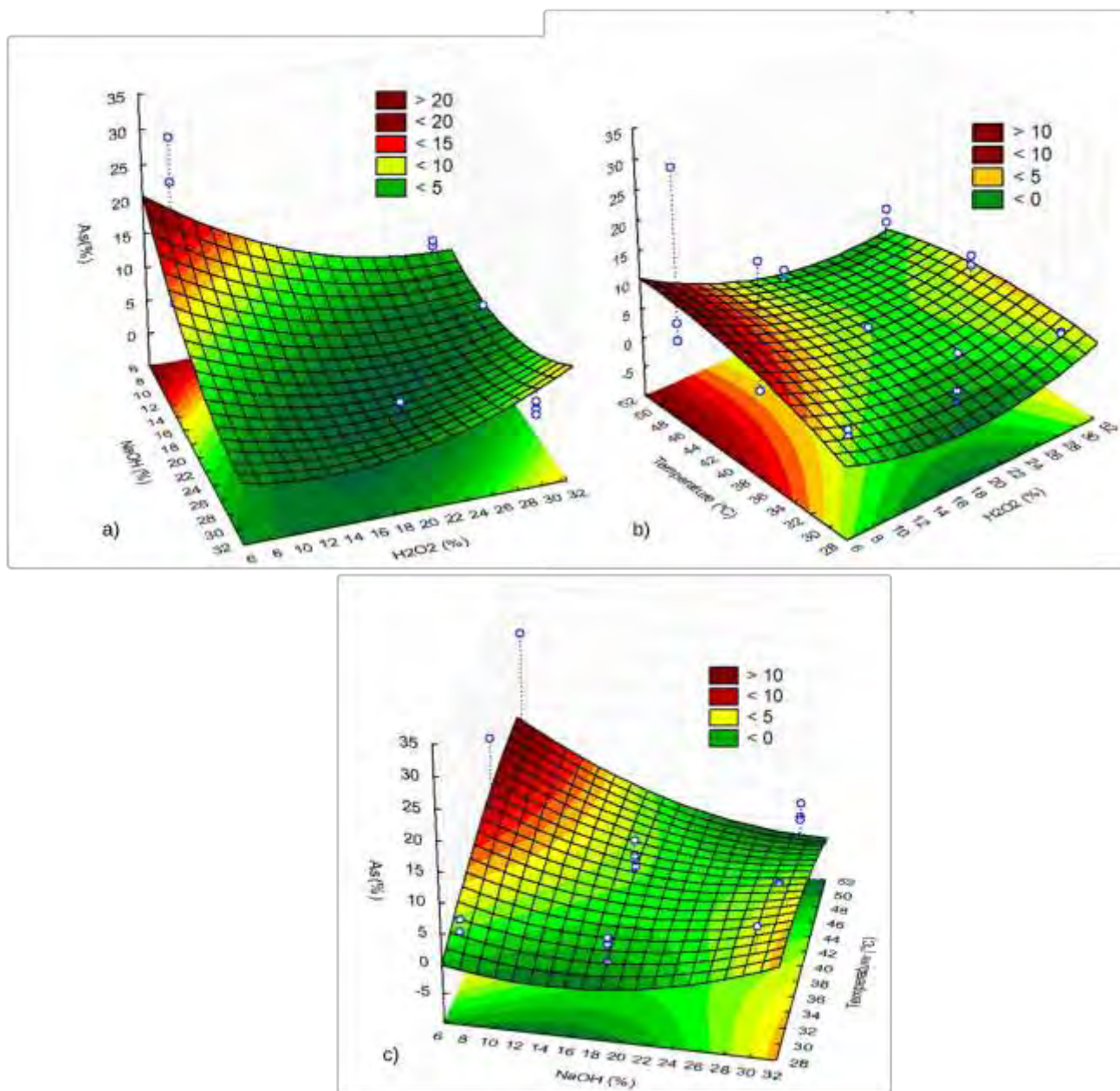


Figura 23 Gráficas de contorno respecto al arsénico residual de la celulosa obtenida. Elaboración propia, 2025.

En la Figura 24 se aprecia, primero, una reducción marcada del arsénico respecto al sargazo crudo (SC) con 83 mg/kg, ya que en la mayoría de las corridas (barras azules) cae a valores bajos entre 0–10 mg/kg. Esto indica que el proceso de extracción y lavado es efectivo para eliminar compuestos no deseados de la celulosa obtenida, probablemente por solubilización y arrastre de sales y minerales asociados al As. Sin embargo, hay corridas donde el arsénico residual se mantiene más alto, por ejemplo, en la corrida 2 (NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 8% a 40° C por 300 min.) y 3 (NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 8% a 50° C por 210 min.), claramente por encima de varias corridas, lo que sugiere variaciones en el grado de remoción, que puede deberse a lavados insuficientes, retención de inorgánicos o a condiciones que no favorecen el arrastre del arsénico.

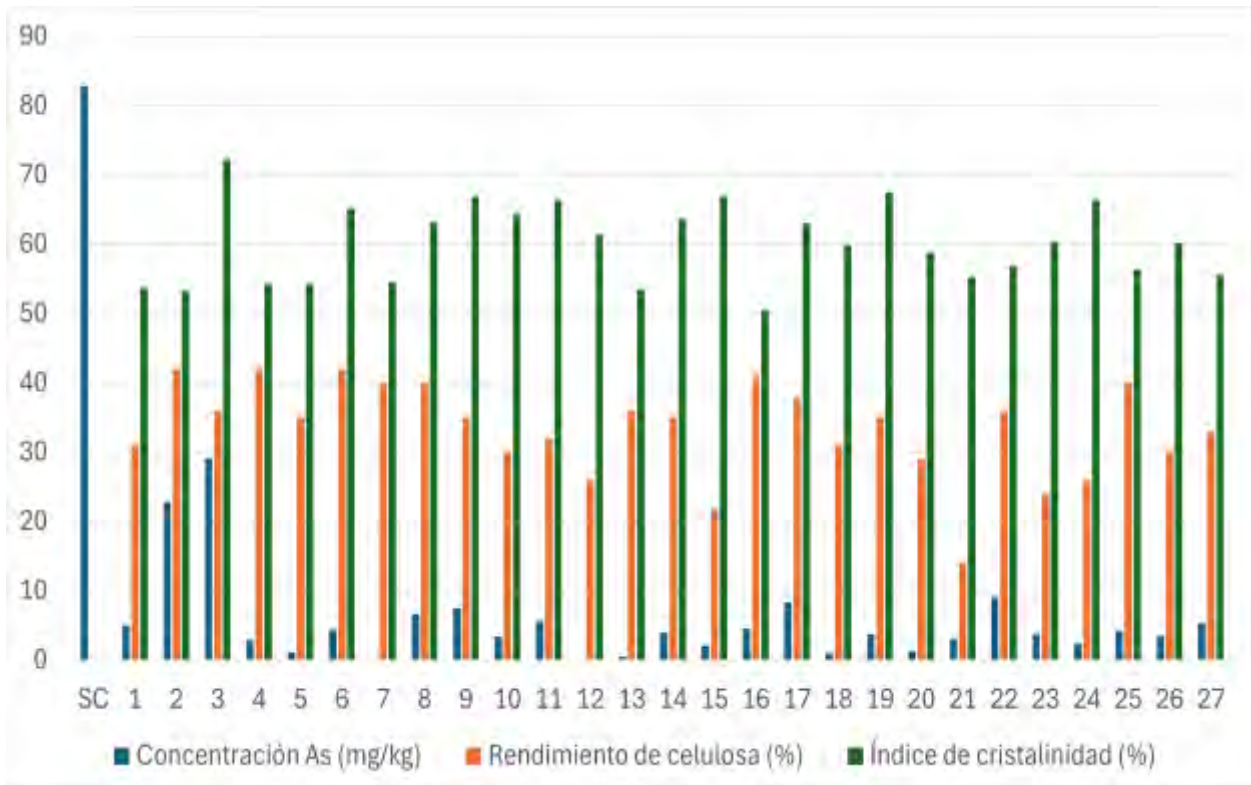


Figura 24 Gráfica de columnas agrupadas de concentración de arsénico residual y rendimiento de celulosa por corrida. Elaboración propia, 2025.

En paralelo, el rendimiento de celulosa entre 20–42% y el índice de cristalinidad (I-Cr Segal) entre 50–72% muestran un proceso adecuado en la extracción en general, cuando se remueven componentes amorfos y extractivos e inorgánicos, el I-Cr tiende a mantenerse alto entre 60–67%, (que se observa en varias corridas), lo cual es consistente con un enriquecimiento relativo de la fracción celulósica. No obstante, como se observa en este estudio, un I-Cr alto no siempre implica mayor rendimiento, las condiciones más severas pueden aumentar el I-Cr por eliminación de fases amorfas, pero también reducir la masa recuperada por pérdidas y degradación del producto. Es importante señalar que, al seleccionar condiciones óptimas, conviene priorizar el rendimiento de celulosa entre 40–42% como en el caso de las corridas C4 y C6, la presencia de arsénico bajo, menor que 20 mg kg<sup>-1</sup> y un I-Cr alrededor de 60–67%; bajo esa lógica, corridas con 42 % de celulosa, pero con arsénico elevado (como la corrida 2) serían menos deseables que corridas con rendimiento similar y baja concentración de As, por ejemplo, la corrida 4 (NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 19% a 30° C por 300 min.) o la corrida 6 (NaOH al 7%, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 19% a 50° C por 120 min.).

## Conclusiones

Por lo tanto, podemos concluir que el presente estudio cumplió los objetivos planteados, donde el primer objetivo muestra que el *Sargassum spp.* es rico en materia orgánica, entre ellos polisacáridos como la celulosa amorfa (35% I Cr), pero con altas concentraciones de arsénico de aproximadamente  $82 \text{ mg kg}^{-1}$ . Sin embargo, mediante la evaluación del método de oxidación alcalina respecto al efecto de los factores de concentración de NaOH, concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , tiempo y temperatura para la mayor obtención de celulosa con la menor concentración de arsénico en el segundo objetivo, se encontró que el factor con el mayor efecto para la extracción máxima es el hidróxido de sodio, al igual que para la reducción de arsénico total. No obstante, el efecto significativo se correlaciona linealmente positivo con el peróxido de hidrógeno y negativamente con la temperatura.

Para el cumplimiento del tercer objetivo se presenta que las condiciones óptimas son de NaOH al 7%,  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 19% a  $30^\circ \text{ C}$  por 300 min o  $50^\circ \text{ C}$  por 120 min. donde nos permitió una extracción del 15.54% de celulosa semicristalina (65.14% I Cr) con una estabilidad térmica moderada alta hasta los  $290^\circ \text{ C}$  con  $4.37 \text{ mg kg}^{-1}$  de arsénico total (cuarto objetivo). Aunque no existe una norma que regule la concentración máxima del metaloide en referencia a la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 donde establece que, para productos de uso agrícola o uso comercial, el límite máximo permisible para el arsénico es de  $22 \text{ mg kg}^{-1}$ . Esto representa que se obtuvo un biomaterial de bajo potencial tóxico y contaminante.

Por lo tanto, hipótesis donde las condiciones del proceso de extracción alcalina permiten maximizar el rendimiento de celulosa y reducir la concentración de arsénico total en biomasa de *Sargassum spp.* es aceptada debido al efecto de la NaOH,  $\text{H}_2\text{O}_2$  y la temperatura, del método peroxialcalino que es un método, por la naturaleza y concentración de los reactivos usados, de bajo riesgo, impacto ambiental y demanda energética, además de que sus residuos pueden ser también aprovechados.

## Recomendaciones a futuro

Debido a los alcances establecidos para este proyecto no se pudo profundizar en las aplicaciones potenciales de la celulosa obtenida, sin embargo, se recomienda realizar estudios por dispersión dinámica de luz (DLS) para inferir sus potenciales aplicaciones en diferentes productos, es decir, al utilizar partículas dispersas como dispersiones para refuerzo de materiales poliméricos para aplicaciones en construcción o textiles, biocombustibles y bioplásticos, por los resultados obtenidos de la reducción de arsénico como metaloide potencialmente tóxico.

Además de la caracterización de los residuos, que, aunque la literatura sugiere que la predominancia de los residuos de la extracción son azúcares como glucosa, existen investigaciones actuales enfocadas a la fermentación de estos compuestos para la producción de bioetanol.

## Referencias

(s.f.).

Abolore , R., & et. al. (2024). Métodos verdes de extracción de celulosa a partir de biomasa lignocelulósica: una revisión. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*.

Acosta, E. (2022). Extracción, caracterización y actividad antioxidante de lignina de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y cáscara de nuez pecanera (*Carya illinoensis*) . *Biotechnia* .

Alba N. , A., & et. al. (2024). Extracción mejorada de celulosa a partir de residuos de pseudotroncos de plátano: análisis comparativo utilizando métodos químicos asistidos por ultrasonidos convencionales y focalizados. *MDPI*.

Albalasmeh, A. A.-S. (2023). Las algas como posibles adsorbentes de metales pesados: mecanismos, limitaciones y perspectivas futuras. *Chemosphere*.

Aldana Aranda , D. (2020). México Ante el Sargazo. *Ciencia*.

Alvarado Flores, J. J. (2022). Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of *Sargassum* spp from Mexico: Potential for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(28), 12851-12865. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.051>.

Alvarado Salazar, A. L. (2021). Evaluación de sargazo para su aplicación como soporte-sustrato en la producción de antioxidantes (Tesis de licenciatura). . *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México*. <https://oai.uaaan.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/47796/K%2066964%20Alvarado%20Salazar%2c%20Ana%20Lilia%20Guadalupe.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Arce, J. C. (2012). Peligros geoquímicos del arsénico en el agua subterránea.

Arias Ruiz , F. O. (2023). Estudio de la viabilidad de la valorización de las algas del género *Sargassum* del mar Caribe. *Escuela Politécnica Superior de Orihuela*.

Azcorra May, K. J. (2021). Desarrollo de un proceso de obtención de compuestos de valor agregado a partir del sargazo recolectado en el Caribe mexicano (Tesis de maestría). *Centro*

de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Recuperado de [https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/2757/1/PCER\\_M\\_Tesis\\_2021\\_Karla\\_Jared\\_Azcorra\\_May.pdf](https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/2757/1/PCER_M_Tesis_2021_Karla_Jared_Azcorra_May.pdf).

- Baghel, R. S. (2021). Seaweed-based cellulose: Applications, and future perspectives. . *Carbohydrate Polymers*, 267, 118241.
- Barron, P. &. (2024). *Introducción al análisis elemental* . Obtenido de [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica\\_Anal%C3%ADtica/M%C3%A9todos\\_F%C3%ADsicos\\_en\\_Qu%C3%ADmica\\_y\\_Nano\\_Ciencia\\_\(Barron\)/01%3A\\_An%C3%A1lisis\\_Elemental/1.01%3A\\_Introducci%C3%B3n\\_al\\_An%C3%A1lisis\\_Elemental](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/M%C3%A9todos_F%C3%ADsicos_en_Qu%C3%ADmica_y_Nano_Ciencia_(Barron)/01%3A_An%C3%A1lisis_Elemental/1.01%3A_Introducci%C3%B3n_al_An%C3%A1lisis_Elemental)
- Batista de Vega , G., & et.al. (2022). *Atlas de las macroalgas del Caribe panameño: su autofluorescencia y usos*. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI).
- Beevi Ummalya, S. (2024). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of bamboo residues and its influence on physiochemical properties and enzymatic digestibility for bioethanol production. *Frontier Energy Research* .
- Bruker. (2024). *Guía de espectroscopía infrarroja* . Obtenido de <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html>
- Chávez , Perez , & et. al. (2022). One-pot isolation of nanocellulose using pelagic sargassum spp. from the caribbean coastline.
- Chávez, V. R.-M.-P. (2023). Afluencias masivas de Sargassum pelágico en el Caribe mexicano: patrones de llegada y desafíos para su gestión. *Science of The Total Environment*.
- Coates, J. (2000). Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. En R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. (pp. 10815–10837).Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Cullity, B. D. (2001). *Elements of X-Ray Diffraction*. Prentice Hall.

- Decología.info. (2024). *Algas Marinas. Qué Son, Tipos, Características, Propiedades*. Obtenido de [https://decologia.info/ecosistemas/algas-marinas/#google\\_vignette](https://decologia.info/ecosistemas/algas-marinas/#google_vignette)
- Devault, D. M. (2022). Contenido de microcontaminantes del sargazo arrastrado a la costa: evaluación de la amenaza del arsénico y la clordecona y recomendaciones de gestión para el Caribe. *Environmental Science and Pollution Research*, , 29, 66315–66334. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20300-3>.
- Devault, D. P. (2021). Contaminación por sargazo y consecuencias para usos posteriores: una revisión. *Journal of Applied Phycology*, 33, 567–602. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02250-w>.
- Dreckmann, K. M. (2013). Los arribazones de algas marinas en el Caribe mexicano: Evento biológico natural o basura en las playas. *CONABIO. Biodiversitas*, 107, 7-11.
- EcoExploratorio. (2024). *Algas marinas*. Obtenido de <https://ecoexploratorio.org/vida-en-el-mar/especies-marinas/algas-marinas/>
- EPA. (30 de noviembre de 2023). *Información básica sobre el sargazo*. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-sargazo>
- Espinosa-Antón, A. A.-L. (2024). Arribazón de sargazo pelágico: ¿utilidad o problema para la agricultura local? *Bioagrociencias*, 17(1), 1-15. <https://www.revista.cba.uady.mx/ojs/index.php/BAC/article/viewFile/5360/2207>.
- Farias, D. T., Labidi, J., & et. al. (2024). Aislamiento de nanocristales de celulosa asistido por hidrólisis ácida a partir de pulpa de madera Kraft de *Acacia mearnsii* de Wild. *Polymers*.
- Fernandez, & Gerardiny, R. (2022). “APROVECHAMIENTO DE DOS ALGAS MARINAS RESIDUALES (*Ulva papenfussi* Pham-Hoang Hö & *Rhodymenia corallina* (Bory) Greville) COMO FUENTE POTENCIAL PARA LA EXTRACCIÓN DE CELULOSA”.
- Florez, Roldán, & Juscamaita. (2024). *EVALUACIÓN DE FITOTOXICIDAD Y CARACTERIZACIÓN DE UN FERTILIZANTE LÍQUIDO ELABORADO MEDIANTE FERMENTACIÓN LÁCTICA UTILIZANDO SUBPRODUCTOS DEL PROCESAMIENTO*

DE TRUCHA (*Oncorhynchus mykiss*). Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/341/34165034009/>

- Fuentes Herrera, I. A. (2018). Extracción de celulosa a partir de *Opuntia ficus* para la evaluación sobre la retención de flúor (F<sup>-</sup>) . *Repositorio Nacional CONACYT*, <https://www.repositorionacionalcti.mx/recurso/oai:ri.uaemex.mx:20.500.11799/95106>.
- García-García, A. M.-C. (2020). Actualización taxonómica de las algas rojas (Rhodophyta) marinas bentónicas del Atlántico mexicano. *Acta Botanica Mexicana*.
- Gómez, M. M. (2013). La problemática del arsénico en el agua subterránea: Un estudio de caso en la región pampeana.
- Hernández, S. (2023). Evaluación del sargazo (*Sargassum* spp.) del Caribe mexicano como sustrato para la producción de metano y comunidad microbiana asociada a la digestión anaerobia. Veracruz .
- Hernández-Arana, H. A. (2020). La descomposición del sargazo en la laguna arrecifal y su biota. *Revista Mexicana de Ciencias*, 36(2), 34–41.
- Iglesias, C. (2020). Fibras textiles a partir de algas: Sostenibilidad en la industria textil, producción y aplicaciones .
- IOGMC. (2025). *Boletín del Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe 1258*. Marina.
- Leal Bautista, R. M., & et. al. (2020). Usos potenciales del sargazo. *Ciencia*.
- Lee, R. E. (2008). *Phycology (4th ed.)*. Cambridge University Press.
- León-Alvarez, D., & et. al. (2017). *Géneros de algas marinas tropicales de México: I. Algas verdes*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.
- Liu, Y. L. (2022). Ultrasonido para la disrupción de células de microalgas y la extracción de productos: una revisión. *Sonoquímica ultrasónica*, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106054>.
- López-Sosa, L. B.-F.-H.-M.-M.-M.-V.-Q.-M.-R.-M. (2020). A prospective study of the exploitation of pelagic *Sargassum* spp. as a solid biofuel energy source. *Applied Sciences*, 10(23), 8706. <https://doi.org/10.3390/app102387061> .

- Lozano et. al. (2024). Aplicación de la energía de microondas a la biomasa: una revisión exhaustiva de las tecnologías asistidas por microondas, los parámetros de optimización y las fortalezas y debilidades. *MDPI*.
- Lozano-Calvo et al. (2024). Extracción alcalina en frío asistida por ultrasonidos: aumento de la extracción de hemicelulosa y la producción de energía a partir de madera de álamo. *MDPI*.
- Machado, B. C. (2024). The potential of algae as a source of cellulose and its derivatives for biomedical applications. *Cellulose*, , 31, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05816-w>.
- Macho Stadler, M. (19 de junio de 2024). *Las algas, un hecho demostrado: son el principal pulmón del planeta*. Obtenido de Mujeres con ciencia.: <https://mujeresconciencia.com/2024/06/19/las-algas-un-hecho-demostrado-son-el-principal-pulmon-del-planeta/>
- Macur, R. C. (2004). Bacterial populations associated with the oxidation and reduction of arsenic in an unsaturated soil. *Environ. Sci. Technol*, 38: 104-111.
- Márquez, L., Cuji, P., Méndez, C., & Flores, D. (2021). Validación del método de cuantificación de lignina en biomasa de pino . *Revista Química Central* .
- Martínez Rodríguez, L. I. (2020). Composición de isótopos estables de carbono y nitrógeno en especies pelágicas de sargazo. (*Tesis de maestría, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.*). Recuperado de [http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/3069/martinez\\_l%20TESIS.pdf](http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/3069/martinez_l%20TESIS.pdf).
- Maurer, A. S. (2015). Sargassum accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(7), 394–395.
- Mendoza, J. S., & Terán, A. T. (2022). Aislamiento de nanocelulosa a partir de Sargassum spp. de la costa caribeña.
- Mendoza, J. S., Terán, A. T., & Herrera, L. E. (2022). Aislamiento de nanocelulosa 2D a partir de a pared celular de Sargassum spp.

- Modenbach , A., & Nokes , S. (2012). El uso de cargas altas de sólidos en el pretratamiento de biomasa: una revisión. *Biotechnology and Bioengineering*.
- Mohan, P., Mohd Yusof , N., & et. al. (2024). Aislamiento de celulosa asistido por ultrasonido y álcali a partir de cáscaras de coco. *Bio Resources* .
- Moohan et al. (2019). Nanofibras de celulosa y otros biopolímeros para aplicaciones biomédicas. Una revisión. *MDPI*.
- Motta, & Rodriguez. (2020). Evaluación del potencial del uso de las algas de arribazón conocidas como sargazo (*Sargassum* spp.). Bogotá, Colombia.
- Mukhopadhyay, R. B. (2002). Microbial arsenic: from geocycles to genes and enzymes. *FEMS Microbiol. Rev.*, 26: 311-325.
- Muthukumar, J. &. (2023). Aislamiento y cuantificación de celulosa de diversas especies de macroalgas de calidad alimentaria. *Cellulose Chemistry and Technology*.
- Nilanthi, F., & et. al. (2015). Evaluación del pretratamiento con peróxido alcalino para la extracción de celulosa de biomasa vegetal seleccionada. *Engineering and Technology of the Open University of Sri Lanka*.
- Oliveira, R. C.-M. (2014). Characterization of metal–biomass interactions in the lanthanum(III) biosorption on *Sargassum* sp. using SEM/EDX, FTIR, and XPS: Preliminary studies. *Chemical Engineering Journal*,, 239, 381–391.DOI: 10.1016/j.cej.2013.11.042.
- Ortega-Flores, P. A.-Z.-M.-P.-R. (2022). Elementos traza en especies pelágicas de sargazo en el Caribe mexicano: Identificación de variables clave que afectan la acumulación de arsénico en *S. fluitans*. *Elsevier*.
- Ortegón, & Ávila. (2020). Arribazón de sargazo en la península de Yucatán: ¿Problema local, regional o mundial? *Bioagrociencias*, págs. 28-37.
- Owusu, W. A. (2024). Sargazo en energía: una revisión de la producción de bioetanol y su importancia en Ghana. *Medio Ambiente Sostenible*, 10, Artículo e2299541. <https://doi.org/10.1080/27658511.2023.2299541>.

- Oyesiku, O. y. (2014). Identification and chemical studies of pelagic masses of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon and *S. fluitans* (Borgessen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria, . *African Journal of Biotechnology* , 13(10): 1188-119 .
- Paar, A. (2014). *The principles of dynamic light scattering* . Obtenido de <https://wiki.anton-paar.com/mx-es/los-principios-de-la-dispersion-dinamica-de-luz/>
- Paletta, R. F. (2024). Efficient reuse of *Sargassum* spp. biomass and organic fraction of municipal solid waste by anaerobic co-digestion in the Dominican Republic: Evaluation of biochemical methanogenic potential and reaction rates. *Applied Chemical Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.59429/ace.v7i2.2081>.
- Parra, Márquez, Semjonova, Serrano, & Vlasova. (2022). Adsorption properties of carbonized sargassum algae.
- Paulino Frías, S. B. (2023). Composición química y nutricional del sargazo (*Sargassum* spp.) arribado a las costas de la provincia La Altagracia. *APF*, 11(1), 37–48. Recuperado de <https://sodiaf.org.do/apf/index.php/apf/article/view/144>.
- Pereira. (2022). BROMATOLOGICAL COMPOSITION AND HEAVY METAL CONTENT OF SARGASSUM LANDINGS IN.
- Pérez Reyes, C. (1997). Composición química de *Sargassum* colectado en la Bahía de La Paz, B.C.S., y la factibilidad de su aprovechamiento en forma directa o como alginato (Tesis de maestría). *Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas*. .
- Polett, Cruz, & Zavala. (2022). USE OF SARGASSUM AS AN ALTERNATIVE MATERIAL IN CONSTRUCTION INDUSTRY.
- Porgorski , J., & Berg, M. (2020). Materiales suplementarios para tratamiento global de aguas subterráneas. *Science* .
- Q, L. (. (2024). *uímica Orgánica (Wade): Espectroscopia Infrarroja y Espectrometría de Masas: Espectroscopia infrarroja (IR)*. Obtenido de [/11%3A\\_Espectroscopia\\_Infrarroja\\_y\\_Espectrometr%C3%ADa\\_de\\_Masas/11.02%3A\\_Espectroscopia\\_infrarroja\\_\(IR\)\)/11%3A\\_Espectroscopia\\_Infrarroja\\_y\\_Espectrometr%C3%ADa\\_de\\_Masas/11.02%3A\\_Espectroscopia\\_infrarroja\\_\(IR\)\)](#)

- Rangel Montoya, E. A. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118.
- Rasaq S., A., & et. al. (2024). Métodos de pretratamiento verdes y sostenibles para la extracción de celulosa a partir de biomasa lignocelulósica y sus aplicaciones: una revisión. *Elsevier*.
- Rico-Rodríguez, M. Á.-S.-G.-S.-G. (2013). Caracterización de tres suelos en Hidalgo y Querétaro, México: disponibilidad y daño tóxico por arsénico en garbanzo (*Cicer arietinum* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 45(1) Recuperado en 06 de diciembre de 2024, de [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1853-86652013000100019&lng=es&tlng=pt](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-86652013000100019&lng=es&tlng=pt).
- Rodríguez. (s.f.). *Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo (EIMAS) en Quintana Roo*.
- Rodríguez, D. (Octubre de 2020). *Fundamentos del análisis termogravimétrico*. Obtenido de Espectrometría: <https://espectrometria.com.mx/fundamentos-del-analisis-termogravimetrico/>
- Rodríguez-Martínez, R. E. (2020). El sargazo en los pastos marinos y arrecifes. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 15(1), 28–33.
- Rodríguez-Martínez, R. E.-D.-P. (2021). El Sargassum en el Caribe: una nueva amenaza para los ecosistemas costeros y la salud humana. *Frontiers in Marine Science*.
- Roig-Munar, F. X. (2022). Pérdida de sedimento asociada a la retirada de depósitos de Sargassum spp. en las playas del Caribe. *Nemus: Revista de l'Ateneu de Natura*.
- S. Abolore et al. (2024). Métodos de pretratamiento ecológicos y sostenibles para la extracción de celulosa a partir de biomasa lignocelulósica y sus aplicaciones: una revisión. *Elsevier*.
- Sadare, O., & et. al. (2022). Optimización paramétrica de la producción de nanocristales de celulosa (CNC) a partir de olotes sudafricanos mediante un enfoque de modelado empírico. *Sci Rep*.

- Sakhrieh, A. (2019). THE ADIABATIC FLAME TEMPERATURE AND LAMINAR FLAME SPEED OF METHANE PREMIXED FLAMES AT VARYING PRESSURES. *BY-NC-ND*.
- Salazar. (2023). Estudio de compuestos híbridos: nanofibras y películas de celulosa nanocristalina reforzadas con grafeno (oxidado o reducido) por electrohilado.
- Salud, O. P. (1987). Arsénico en la salud pública en América Latina y el Caribe.
- Santini, J. M. (2000). A new chemolithoautotrophic arsenite-oxidizing bacterium isolated from a gold mine: Phylogenetic, physiological, and preliminary biochemical studies. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66: 92-97.
- Sariñana-Aldaco, O. B.-M.-M.-O.-J.-R.-M. (2021). Efecto de extractos de *Sargassum* spp. en el crecimiento y antioxidantes de plántulas de tomate. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(2), e2814. Epub 31 de enero de 2022. <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2814>.
- Seddiqi, H. O. (2021). La celulosa y sus derivados: hacia aplicaciones biomédicas. *Cellulose*.
- SEMAR. (2024). Boletín semanal No. 277/24 sobre el seguimiento de *Sargassum* en el Mar Caribe (del 18 al 24 de noviembre de 2024). *Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe. Recuperado de [https://digaohm.semar.gob.mx/OpSargazo/BoletinesSemanales/MARZO/SARGAZO\\_149\\_08\\_MARZO\\_2022.pdf](https://digaohm.semar.gob.mx/OpSargazo/BoletinesSemanales/MARZO/SARGAZO_149_08_MARZO_2022.pdf)*.
- SEMARNAT. (2021). *Lineamientos Técnicos y de Gestión para la Atención de la Contingencia Ocasionada por Sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México*.
- Singh, R. R. (2022). Biosorción de iones de metales pesados de soluciones acuosas mediante biomasa de *Sargassum wightii*: estudios de cinética y equilibrio. *Journal of Hazardous Materials Advances*.
- Soo Park, B., & Zhun Li. (2022). *Taxonomy and Ecology of Marine Algae*. MDPI.
- Stiger. (2022). EVOLUTION OF RAFTS (MORPHOTYPES RATIO, SIZE STRUCTURE, BIOMASS), PHENOLIC CONTENT AND POLYSACCHARIDE QUALITY OF

## HOLOPELAGIC SARGASSUM SPECIES DURING THEIR DRIFT UNTIL THEIR STRANDING.

- Suárez, A. M.-D. (2018). La problemática del sargazo en el Caribe. . *Centro de Investigaciones Marinas, Universidad de La Habana*.
- UNAM, F. d. (2024). *Microscopía electrónica* . Obtenido de <https://quimica.unam.mx/investigacion/servicios-para-la-investigacion/usaii/microscopia-electronica/>
- Vallejos, M. E. (2024). “NANOCELIA: Producción de celulosa nanofibrilada y microfibrilada en Iberoamérica”:. *Astra Ediciones*. .
- Van Tussenbroek, B. I.-M. (2017). Afluencias masivas de Sargassum pelágico en el Caribe mexicano: patrones de llegada e impactos. *Journal of Coastal Research*.
- Vincent , O., & et. al. (2019). Fraccionamiento de biomasa lignocelulósica mediante ácidos minerales y procesos de purificación de los extractos resultantes: condiciones, rendimientos y purezas. *MDPI*.
- Vinhas et al. (2023). Un nuevo protocolo asistido por microondas para la extracción de celulosa a partir de residuos de madera de eucalipto y pino. *MDPI*.
- Wang, M. &. (2017). “Mapeo y cuantificación de la inundación mundial de Sargassum en el Golfo de México y el Mar Caribe mediante imágenes satelitales. *Remote Sensing of Environment*.
- Woźniak, A. K. (2025). Review of lignocellulosic biomass pretreatment using physical, thermal and chemical methods for higher yields in bioethanol production. *Sustainability*, 17(1), 287. <https://doi.org/10.3390/su17010287>.
- Yang, X., & Zhu , W. (2017). Propiedades de viscosidad de soluciones de carboximetilcelulosa sódica. *Cellulose* .
- Ying, Xuesonghuang, & Cheong. (2017). Avances recientes en polisacáridos de algas marinas: aislamiento, estructura y actividades.

# Cronograma de actividades

Actividades				1° semestre		2° semestre		3° semestre		4° semestre		
				2024- A1	2024- A2	2024- B1	2024- B2	2025- A1	2025- A2	2025- B1	2025- B2	
Experimentación	Etapa 1: Caracterización sargazo (Biomasa celulósica)	Investigación	Redacción de trabajo de tesis	x	x	x	x	x	x	x	x	
		Proximal	COT, STF, STV, CHON, Extraíbles	x	x	x	x					
		Elementos traza	ICP-OES para AS			x	x	x	x			x
		Química estructural	FTIR, DRX, TGA	x	x					x		
	Etapa 2: Identificación de procesos para extracción de celulosa	Establecer el diseño de experimentos	27 experimentos con análisis RSM	x	x	x	x	x	x			
		Experimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pretratamiento</li> <li>• Extracción</li> <li>• Purificación</li> </ul>					x	x	x		
	Etapa 3: Caracterización de celulosa obtenida	Química estructural y Arsénico	<ul style="list-style-type: none"> <li>•FTIR</li> <li>•TGA</li> <li>•DRX</li> <li>•ICP</li> </ul>					x	x			
		Análisis estadístico	Análisis por superficie de respuesta									