

AGENDA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN PARA LA ATENCIÓN, ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN DEL ARRIBO DE SARGAZO PELÁGICO AL CARIBE MEXICANO

Documento para consulta pública

Octubre 2019



CONACYT

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces, Directora General
Dr. Fernando Córdova Tapia, Director de Innovación
Dra. Edith Calixto Pérez
Mtra. Gloria Vázquez Rangel

SEMAR

Vicealm. CG. DEM. Julio Cesar Pescina Ávila, Director General de Investigación y Desarrollo
Contraalm. CG. DEM. Enrique Flores Morado, Director General Adjunto de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología
Cap. Nav. CG. DEM Julio Cesar Gorbea Barcelata, Coordinador Interinstitucional de Investigación Oceanográfica
Cap. Nav. CG. DEM. Miguel López Ramírez, Director de Oceanografía

INECC

Dra. Amparo Martínez Arroyo, Directora General
Dra. Margarita Caso Chávez, Coordinadora General de Adaptación al Cambio Climático
Biol. Erwin Martí Flores, Departamento de Adaptación al Cambio Climático de las Especies y sus Hábitat

IMTA

Dr. Adrián Pedrozo Acuña, Director General
M. en C. Jorge Velázquez Suárez, Subcoordinador de Tecnología Aplicada
Dra. María del Pilar Saldaña Fabela, Investigadora
TC. José Luis Zorrilla Hernández, Asesor

CONABIO

Dr. Sergio Cerdeira Estrada, Subcoordinador de Monitoreo Marino

Consejo asesor del CONACYT

Dra. Telma Gloria Castro Romero. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Dr. Sergio Cerdeira Estrada. Dirección General de Geomática, CONABIO
Dra. Elva Escobar Briones. Directora e Investigadora del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
Dr. Víctor López López. Academia de Ingeniería de México
Dra. Amparo Martínez Arroyo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Dra. Patricia Muñoz Sevilla. CIEMAD. IPN
Dr. Adrián Pedrozo Acuña. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Dr. Julio Sheinbaum Pardo. Departamento de Oceanografía Física, CICESE
Dr. Sergio Trejo Estrada. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, IPN
Dra. Brigitta I. van Tussenbroek. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
Dr. Jorge Zavala Hidalgo. Investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Coordinador General del Servicio Meteorológico Nacional

Expertos académicos consultados

Dr. Daniel Robledo Ramírez. CINVESTAV-IPN. Unidad Mérida
Dr. Agustín Escamilla Martínez. Centro de Tecnología Avanzada
Dra. Susana Enríquez Domínguez. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
Dr. Enrique Saldívar-Guerra. Centro de Investigación en Química Aplicada
Dra. Rebeca Betancourt Galindo. Centro de Investigación en Química Aplicada
M. en C. Luis Alberto Villarreal Cárdenas. Centro de Investigación en Química Aplicada

Dr. Carlos José Espinoza González. Centro de Investigación en Química Aplicada
Lic. Alejandra Serrano Pavón.
Dr. Sergio Díaz Martínez. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Grupo de Monitoreo Marino, CONABIO.
Dra. Dalila Aldana Aranda. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Mérida, IPN.
Dr. Ismael Mariño-Tapia. Escuela Nacional de Estudios Superiores Mérida, UNAM.
Dra. Cecilia Enriquez Ortíz. Escuela Nacional de Estudios Superiores Mérida, UNAM
Dr. Rodolfo Silva Casarín. Instituto de Ingeniería, UNAM.
Dr. Jorge Herrera Silveira. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Mérida, IPN.
Dr. Daniel Robledo Ramírez. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Mérida, IPN.
Dra. Ligia Collado Vides. Florida International University.

Este documento se pone a disposición de la comunidad científica y tecnológica de México, para obtener retroalimentación basada en las experiencias de los distintos grupos de investigación que han estudiado el tema.

Contacto: sargazo@conacyt.mx
<https://www.conacyt.gob.mx/sargazo/index.php/agenda-de-ciencia-y-tecnologia>

Imagen de portada: anthonyiskey.com

ANTECEDENTES

El Gobierno de México, a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), fomenta la vinculación efectiva de la comunidad científica y tecnológica del país a través de la solución a problemáticas nacionales que requieren atención inmediata. La vinculación se logra al generar estrategias multidisciplinarias que contribuyen a prevenir riesgos y daños ambientales, económicos, sanitarios y sociales.

Los sargazos son un grupo de algas marinas que incluye un gran número de especies. Muchas de ellas tienen funciones biológicas importantes, ya que son formadoras de hábitat o fuente de alimento para otros organismos. Lo que se conoce como sargazo pelágico está compuesto por dos especies: *Sargassum fluitans* y *S. natans*. Aunque estas especies se distribuyen naturalmente en el Mar de los Sargazos, en la última década han crecido masivamente en el Océano Atlántico sur, transportándose en grandes cantidades por el Mar Caribe. A su llegada masiva en algunas costas del Gran Caribe genera severos problemas ambientales y económicos debido a que al llegar a la playa se descompone y genera una marea marrón (color café), aportando grandes cantidades de nutrientes y material orgánica, impidiendo el paso de luz, y reduciendo la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

Desde 2015, estos arribazones masivos de sargazo pelágico a las costas del Caribe mexicano se han convertido en un problema ecológico y socio-económico que requiere atenderse de forma integral, coordinada, transdisciplinaria e interinstitucionalmente. Por ello, bajo el liderazgo del CONACYT, se creó un grupo de trabajo conformado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), que con el acompañamiento de un Consejo Asesor honorario, analiza de forma integral la problemática y define la agenda científica, tecnológica y de innovación para la atención del sargazo.

OBJETIVO PRINCIPAL DE LA AGENDA

Articular las líneas estratégicas para la creación de capacidades y la generación de conocimiento para la atención, adaptación y mitigación del arribo masivo de sargazo pelágico a las costas del Mar Caribe en México, que contribuyan a la conservación de los ecosistemas marino-costeros y al desarrollo socio-económico de México y de la región del Gran Caribe.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA AGENDA

- Realizar un diagnóstico de las capacidades nacionales existentes para la atención del fenómeno de arribo de sargazo pelágico a las costas del Caribe mexicano.
- Generar una línea base de información disponible, nacional e internacional.

- Identificar grupos de trabajo en las distintas áreas del conocimiento necesarias para la comprensión del fenómeno.
- Identificar vacíos y omisiones de conocimiento que deban ser atendidos a través de investigación en diferentes escalas temporales y espaciales.
- Identificar y priorizar las necesidades de investigación y desarrollo tecnológico.
- Apoyar en la elaboración y publicación de convocatorias para la ejecución de proyectos basadas en lineamientos y demandas específicas.

ESTRUCTURA DE LA AGENDA

La agenda se encuentra estructurada en 9 líneas estratégicas que de manera conjunta aportan una visión multidisciplinaria para atender el fenómeno de arribo de sargazo pelágico al Caribe mexicano. Para cada una de las líneas estratégicas se describen acciones a través de las cuales se genera conocimiento para comprender el fenómeno, evaluar posibles impactos, desarrollar métodos de modelación y alerta temprana, y al mismo tiempo analizar alternativas de manejo, aprovechamiento y uso del sargazo. Dentro de las líneas estratégicas también se plantean acciones dirigidas a la restauración, el desarrollo de normatividad, programas de comunicación y educación y finalmente acciones necesarias para lograr acuerdos de cooperación internacional que permitan atender el fenómeno en un contexto regional.

VISIÓN A LARGO PLAZO PARA LA CONSOLIDACIÓN DE ACCIONES

Para lograr la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico al Caribe mexicano en el largo plazo, es necesario que en el corto (primer año) y mediano plazo (1-3 años) se realicen acciones de manera paralela y coordinada de las distintas líneas estratégicas. De esta manera, las líneas estratégicas que se ejecuten, generan insumos para realizar o complementar la ejecución de otras estrategias (Figura 1).

A modo de ejemplo, en la figura 1 se esquematiza como la detección del sargazo en mar genera productos indispensables para validar modelos numéricos de dispersión y arribo a playas ("Alertas tempranas"), estos arribos a playas provocan un impacto en la costa dependiendo de su volumen, y generan lixiviados que deberán medirse y modelarse ("Impacto ambiental y económico en costa"), los cuales pueden emplearse mediante caracterizaciones fisicoquímicas ("Aprovechamiento y usos") y de esta forma generar nuevos ciclos y líneas estratégicas transversales.



Figura 1. Marco conceptual para la consolidación de acciones a largo plazo.

Por lo tanto, al trabajar de manera simultánea, desde el inicio, y en alianza con los sectores científico y tecnológico; las micro, pequeñas y medianas empresas de base científica y dedicadas al sector turismo; grupos de innovación e industriales comprometidos con la sociedad y el cuidado del medio ambiente, así como el gobierno y la sociedad, se lograría la consolidación de acciones en tres etapas:

- a) **Corto plazo:** contrarrestar el riesgo de impacto negativo al ambiente, salud humana; para sostener la actividad turística, y el gran impacto económico y social que ella tiene en nuestro País.

- b) **Mediano plazo:** identificar, generar métodos y procedimientos hacia sistemas, adoptados de tecnología conocida o desarrollados, para procesos y productos derivados del sargazo como bienes de consumo de valor intermedio, que permitan aprovechar un gran volumen de sargazo.
- c) **Largo plazo:** bienes de consumo refinados, de alta pureza y con aplicaciones en nichos de mercado de alto valor, con costos de producción y precios altos, los cuales requieren mayor esfuerzo de investigación y desarrollo.

En la actualidad se están ejerciendo los recursos públicos para la remoción de sargazo que de una u otra forma se convierte en un pasivo ambiental. Encaminar acciones hacia el aprovechamiento del sargazo permitiría que en mediano y largo plazo se transformara un pasivo ambiental en bienes de consumo de baja y eventualmente alta refinación (Figura 2). Esto permitiría que el papel del Estado Mexicano sea regulatorio, y que no se gasten recursos públicos en su remoción y disposición. Es indispensable inducir la gestión de rutas de aprovechamiento, de lo contrario, independientemente de dónde sea recolectado el sargazo, terminaría acumulándose en tierra, sin valor asociado, y con el riesgo de un severo impacto ambiental negativo. Por ello, es urgente la generación de soluciones técnicas y para ello se propone:

1. Colecta y disposición plenamente documentadas que permitan eliminar el riesgo sanitario, el impacto a biodiversidad y los posibles daños a los mantos freáticos ocasionados por lixiviados generados de la disposición temporal del sargazo. Lo anterior debe llevarse a cabo con métodos de prueba plenamente validados y de forma paralela con el desarrollo de normatividad.
2. Desarrollo de procesos de conversión de tecnología intermedia, también llamada tecnología apropiada, que pueden permitir la transformación de grandes volúmenes de sargazo en bienes de consumo para aplicación agrícola, hortícola, forestal, y en otros insumos de valor ecosistémico. Estas acciones deben estar acompañadas de investigación científica que permita descartar posible contaminación por metales pesados o cualquier otro que genere daños a la salud.
3. Con base en ecosistemas de innovación y desarrollo tecnológico, sería posible que en el mediano (3 años) y largo (3 a 10 años) plazo, el sargazo sea un recurso biótico valorado, sujeto de concesión regulada de explotación, para la producción de bienes de consumo derivados de transformación sustentable y en diversas aplicaciones.

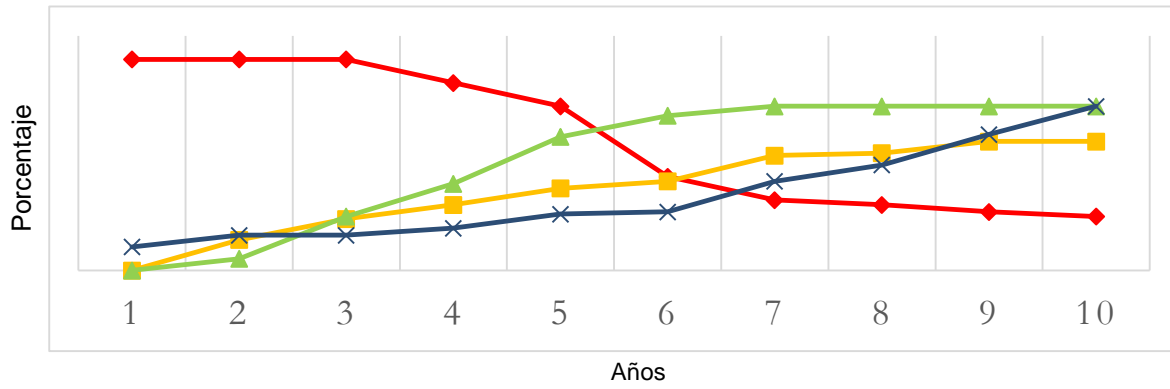
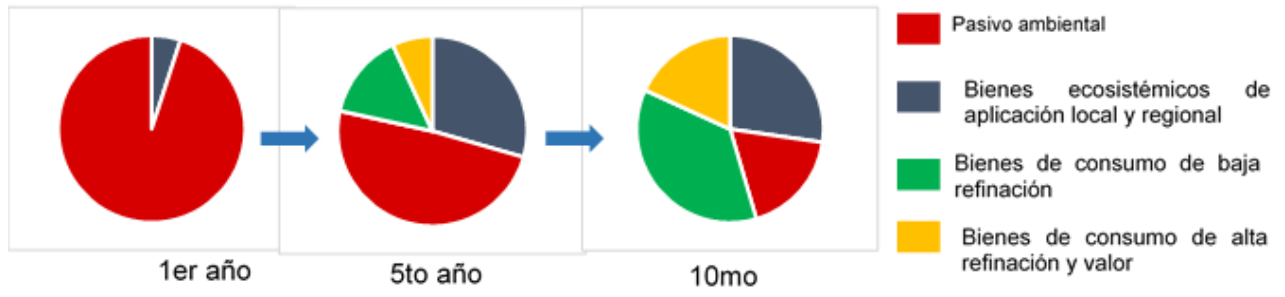


Figura 2. Visión a corto mediano y largo plazo para el desarrollo tecnológico y la innovación para el procesamiento sustentable de sargazo

Líneas estratégicas para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico al Caribe mexicano

1. ORIGEN E IMPORTANCIA ECOLÓGICA

- 1.1. Biología del sargazo, origen y causas del crecimiento masivo
- 1.2. Papel ecológico del sargazo en el Caribe mexicano

2. MONITOREO, MODELACIÓN Y ALERTA TEMPRANA

- 2.1. Monitoreo del sargazo pelágico por sensores remotos
- 2.2. Modelación y pronóstico del desplazamiento del sargazo pelágico
- 2.3. Sistema de información y análisis marino-costero para generar alertas tempranas

3. IMPACTOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES

- 3.1. Impactos socioeconómicos
- 3.2. Impactos ambientales

4. CONTENCIÓN, RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN

- 4.1. Contención y recolección del sargazo en el mar
- 4.2. Recolección del sargazo en la playa
- 4.3. Disposición temporal y final del sargazo

5. APROVECHAMIENTO Y USOS

- 5.1. Aprovechamiento sustentable e innovación
- 5.2. Usos industriales potenciales

6. RESTAURACIÓN

- 6.1. Restauración de ecosistemas, rehabilitación y recuperación de la zona costera

7. NORMATIVIDAD

- 7.1. Marco legal para la contención, la recolección, la disposición, el procesamiento y el uso industrial del sargazo
- 7.2. Ordenamiento ecológico marino-costero del Caribe mexicano

8. COMUNICACIÓN Y EDUCACIÓN

- 8.1. Desarrollo de estrategias de comunicación y educación ambiental

9. COOPERACIÓN INTERNACIONAL

- 9.1. Colaboración internacional para la atención del sargazo en el Gran Caribe

Acciones indispensables para el desarrollo de las líneas estratégicas

1. ORIGEN E IMPORTANCIA ECOLÓGICA

1.1. Biología del sargazo, origen y causas del crecimiento masivo

*Actualmente existen diversas hipótesis sobre el origen de las masas flotantes de sargazo pelágico que llega a las costas de México y sobre las causas que generaron un incremento en su crecimiento en los últimos años. Por lo tanto, el desarrollo de proyectos de investigación permitirá reducir los vacíos de conocimiento en ciencia básica sobre las especies de sargazo pelágico (*Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*), las causas de su presencia, la dinámica y variabilidad de su distribución geográfica y su relación con la variabilidad estacional.*

- 1.1.1. Describir la biología del sargazo pelágico y su fisiología, tal como la respuesta fotosintética a la luz, nutrientes y a la temperatura, así como su tasa de respiración y cambios en el cociente fotosíntesis/respiración.
- 1.1.2. Describir la tasa de descomposición del sargazo pelágico en diferentes condiciones de temperatura, disponibilidad de nutrientes y salinidad.
- 1.1.3. Caracterizar la diversidad y estructura genética espacio-temporal de las diferentes poblaciones de *Sargassum fluitans*, *S. natans* y sus distintos morfotipos para analizar sus orígenes filogenéticos, origen e interconexión de las poblaciones, y los desplazamientos en el océano Atlántico y Caribe, especialmente de las poblaciones que arriban a las costas de Quintana Roo.
- 1.1.4. Caracterizar el microbioma del sargazo en condiciones pelágicas y durante su descomposición en la playa en condiciones aeróbicas.
- 1.1.5. Analizar el papel de las comunidades bacterianas asociadas al sargazo en el proceso de descomposición y la consecuente producción de H₂S.
- 1.1.6. Investigar el crecimiento y la fisiología de *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* y sus morfotipos bajo diferentes condiciones ambientales (entre otros la luz, temperatura, concentración de nutrientes y salinidad).
- 1.1.7. Comprender la variación interanual de amplia escala de los patrones de circulación oceánica y atmosférica y sus causas.

1.2. Papel ecológico del sargazo en el Caribe mexicano

- 1.2.1. Estudiar el sargazo pelágico como hábitat en mar abierto y su variabilidad estacional e interanual.
- 1.2.2. Conocer la diversidad biológica asociada al sargazo (virus, microbioma, epibiontes, megafauna) e indicadores de biodiversidad en mar abierto, en la laguna arrecifal y en la playa.

- 1.2.3. Evaluar el efecto de desechar el sargazo en comunidades bénticas de mar profundo.
- 1.2.4. Conocer los flujos y captura de carbono del sargazo en mar abierto, laguna arrecifal y en la playa, y su variabilidad estacional.
- 1.2.5. Estudiar la variabilidad espacio-temporal en la composición bioquímica del sargazo.
- 1.2.6. Determinar la estructura trófica asociada al sargazo, potenciales consumidores e impacto ecológico en la biodiversidad.

2. MONITOREO, MODELACION Y ALERTA TEMPRANA

2.1. Monitoreo del sargazo pelágico por sensores remotos

La creación de un sistema nacional de monitoreo y alerta temprana es fundamental para reconocer tempranamente los puntos de arribo de sargazo y establecer acciones y focalizar los esfuerzos de atención. La detección del sargazo puede realizarse mediante la utilización de satélites-sensores (MODIS, GOES-16, Sentinel, Planet, WorldView-3), radares de alta frecuencia, drones, aeroplanos, helicópteros, gliders submarinos o vehículos autónomos submarinos (AUV). Cada estrategia tiene capacidades y resolución diferente en la identificación de la distribución y cálculo del volumen de sargazo. La información permite estimar la trayectoria de desplazamiento hacia la costa mexicana. A partir de datos de detección y de datos oceanográficos (oleaje, marea, corrientes, batimetría y meteorología) se generan modelos de simulación de la distribución y desplazamiento del sargazo, escenarios y pronósticos del desplazamiento.

- 2.1.1. Analizar las áreas mínimas de sargazo detectadas por diversos sensores remotos (análisis de sensibilidad), para determinar la relación costo-beneficio del uso de cada sensor, así como determinar las ventajas y limitaciones de diferentes sensores remotos para monitorear el comportamiento espacio-temporal del sargazo.
- 2.1.2. Validar o verificar los productos generados con percepción remota con los datos de la caracterización óptica. Análisis espectral del sargazo pelágico (en mar abierto, en la laguna arrecifal y en la playa), en sus diferentes ciclos de vida, así como el tipo de agua asociada para validar los algoritmos de detección por sensores remotos tanto existentes como nuevos.
- 2.1.3. Desarrollar una relación cuantitativa y cualitativa a escala costera entre el sargazo que se detecta con sensores remotos y el que se cuantifica en la playa.
- 2.1.4. Analizar, a partir de sensores remotos, la relación entre las agregaciones de sargazo y las condiciones oceanográficas e hidrometeorológicas.
- 2.1.5. Monitorear diversos parámetros biofísicos marinos (Ej. temperatura superficial del mar, color del mar, transparencia, viento superficial, corrientes marinas, aerosoles atmosféricos y nivel del mar).

2.2. Modelación y pronóstico del desplazamiento del sargazo pelágico

Basados en el monitoreo por sensores remotos y de datos oceanográficos (oleaje, marea, corrientes, batimetría y meteorológicos), elaborar modelos de simulación de la distribución y desplazamiento del sargazo, así como pronósticos del desplazamiento en función de cambios en diferentes variables ambientales y elementos de cambio climático.

- 2.2.1. Determinar las ventajas y limitaciones de diferentes modelos numéricos para identificar y pronosticar las trayectorias y tiempos de arribo del sargazo considerando:
 - a. La aplicación para el control de las operaciones de colecta marítima y terrestre.
 - b. Los procesos oceanográficos involucrados en su transporte y dispersión a diferentes escalas espacio-temporales. Determinar las variables y factores que inciden directamente en el fenómeno (los patrones de circulación del Atlántico norte, oleaje, estrés eólico, enfriamiento de la columna de agua, las variaciones en los nutrientes, la salinidad, la concentración de CO₂ y la temperatura) y el grado de influencia a diferentes escalas (mesoescala, submesoescala, costero, recrecimiento).
 - c. La forma óptima de modelar el sargazo (considerándolo como partículas inertes, partículas interconectadas, derrame de hidrocarburos, como organismos vivos, como almacenes de carbono orgánico, etc.).
 - d. Los procesos de interacción hidrodinámica entre el océano y la zona costera que influyen en el movimiento del sargazo.
 - e. Evaluar las modelaciones a través de la determinación de las rutas de deriva o derroteros de las agregaciones de sargazo usando mediciones directas como las comparativas de las velocidades geostroóficas y/o la implementación de experimentos con boyas de deriva.
 - f. Entender las variables que inciden directamente en el fenómeno y diferenciarlas de las respuestas colaterales.
 - g. Entender la variabilidad a corto (anual), mediano (decadal) y largo plazo (centurias) de las afluencias que llegan a las costas de México.
 - h. Ahondar la comprensión de la profundidad, extensión, duración y propagación de las estructuras de mesoescala y submesoescala.
 - i. Hacer una integración de las capas atmosféricas, del océano superficial y de la línea de arrecife a nivel costero.

2.3. Sistema de información y análisis marino-costero para generar alertas tempranas

Establecer un sistema de información y análisis marino-costero que integre bases de datos operacionales de registros de monitoreos in-situ, sensores remotos y modelos para derivar sistemas operacionales de alertas tempranas para la toma de decisiones, en particular para alertar la presencia de sargazo pelágico en superficie marina y costera. Con ello se desarrollan capacidades para el monitoreo y la detección temprana del sargazo, determinar los sitios potenciales de arribo de sargazo pelágico y establecer la logística de acción en la costa con un mejor manejo del recurso financiero.

- 2.3.1. Generar bases de datos estandarizadas y de acceso abierto sobre la información relativa a los monitoreos del sargazo pelágico, que apoyen el análisis necesario para la investigación y el manejo del sargazo. Deben contener registros de los siguientes aspectos:
 - a. Registro de presencias de sargazo pelágico (del mar a la costa) mediante aplicaciones móviles basados en ciencia ciudadana que considere procesos de validación externa para evitar falsos positivos.
 - b. Estadísticas generales del sargazo que arriba a la costa, su recolección y disposición final.

- c. Directorio de instituciones, investigadores y organizaciones de la sociedad civil que se especialicen en temas relacionados con el sargazo.
 - d. El acopio de datos confiables provenientes del monitoreo costero permanente de parámetros físicos, químicos, biológicos y ópticos.
 - e. La sistematización de datos relacionados con el turismo, la pesca y los aspectos socioeconómicos en la región, así como los cambios en las actividades económicas de la población ante la llegada del sargazo.
- 2.3.2. Desarrollar un sistema de alerta temprana de detección del sargazo a diferentes escalas que permita pronosticar la trayectoria del sargazo y tomar decisiones sobre las estrategias más adecuadas relativo a las acciones de contención y recolección tanto en el mar como en la playa. El sistema requiere de:
- a. Una metodología detallada para identificar sargazo pelágico tanto en el mar como el acumulado en la playa, que incluya diferentes resoluciones espacial, radiométrica y temporal.
 - b. Una plataforma web interactiva que genere productos operacionales asociados a la alerta temprana, sobre la base de información in-situ, de sensores remotos y de modelos.
 - c. La generación automática de reportes periódicos como resultado de la alerta temprana de detección. La periodicidad del informe está asociada a las diferentes fuentes de información.

3. IMPACTOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES

La implementación de un sistema de monitoreo integral de largo plazo permite evaluar el impacto socioeconómico y ambiental causado por las arribaciones masivas de sargazo. Se requiere analizar el impacto sobre la condición ambiental de los ecosistemas marino-costeros y los cambios que presentan tanto espaciales como temporales resultado de las arribaciones y la sinergia con otras actividades que degradan a los ecosistemas costeros. Igualmente importante es analizar los impactos socioeconómicos de la presencia de sargazo en las costas del Caribe mexicano en los sectores turístico, de salud y pesquero. Esto permitirá contar con indicadores de precisión acerca de la magnitud de la problemática, así como el establecimiento de una agenda dinámica de atención.

3.1. Impactos socioeconómicos

Es fundamental que se analicen los impactos socioeconómicos de la presencia de sargazo en las costas del Caribe mexicano en los sectores turístico, de salud y pesquero. Esto permitirá contar con indicadores de precisión acerca de la magnitud de la problemática, así como el establecimiento de una agenda prioritaria de atención.

- 3.1.1. Determinar y evaluar los impactos socioeconómicos en los diferentes sectores, en particular el turístico, económico, pesquero, empleo y seguridad, incluyendo los costos asociados a la remoción del sargazo para diferentes actores (gobierno, sector hotelero) y la tasa de desempleo asociada al arribazón de sargazo.
- 3.1.2. Determinar la relación entre el impacto a la salud humana y la descomposición anaeróbica del sargazo que se acumula de forma masiva en las playas, las zonas de acopio y desecho.
- 3.1.3. Evaluar y monitorear el impacto del sargazo depositado de manera inadecuada en los acuíferos de la región, particularmente acerca de la disponibilidad y calidad del agua para la población local.

3.2. Impactos ambientales

Implementación de un sistema de monitoreo integral de largo plazo para evaluar el impacto causado por la arribazón de sargazo sobre los ecosistemas marino-costeros y los cambios espaciales y temporales como resultado de este impacto y la sinergia con otras actividades que degradan a los ecosistemas costeros.

3.2.1. Conocer la salud del ecosistema marino-costero:

- a. Determinar la alteración en la calidad del agua (monitoreo físico-químico y microbiológico) provocada por el arribo y la descomposición del sargazo tomando en cuenta las descargas residuales.
- b. Conocer parámetros bio-ópticos marina para identificar los cambios en las propiedades ópticas del agua mar y en la atenuación de luz en la columna de agua en las zonas de acumulación del sargazo.
- c. Identificar la posible alteración de la condición del sedimento en la laguna arrecifal y acumulación de materia orgánica y sedimentos finos.
- d. Evaluar la condición y pérdida de la pradera submarina y de sus comunidades biológicas.
- e. Evaluar la condición de la comunidad coralina y de sus comunidades biológicas, así como el impacto del sargazo en dichas comunidades.
- f. Evaluar la relación de síndrome blanco del coral con el sargazo.
- g. Evaluar el impacto sobre la biología y reproducción de las tortugas marinas.
- h. Evaluar el impacto sobre la condición ambiental de los manglares y vegetación costera.
- i. Evaluar la erosión en playas.
- j. Conocer los cambios biogeoquímicos.
- k. Conocer los cambios en la microbiota.
- l. Identificar la introducción de especies no nativas asociadas a las masas pelágicas.

3.2.2. Evaluar y determinar los riesgos en la salud de los ecosistemas terrestres y marinos, provocados por el proceso de descomposición anaeróbica del sargazo, haciendo énfasis en las concentraciones de ácido sulfúrico y su impacto en la atmósfera.

3.2.3. Evaluar las afectaciones a la vida marina provocados por los cambios en la calidad del agua y el sedimento.

3.2.4. Analizar el impacto que han producido en distintos ecosistemas los lixiviados derivados de la acumulación masiva de sargazo en la playa.

3.2.5. Determinar y evaluar la relación y sinergia entre el acúmulo y degradación del sargazo con las descargas de aguas negras, residuales, otros contaminantes sobre la calidad del agua y ecosistemas costeros (lagunas, manglares, arrecifes, bahías, pastizales, playas, etc.).

3.2.6. Determinar y evaluar cuál ha sido el impacto de la arribazón de sargazo en la geomorfología y sedimentología litoral, particularmente las afectaciones a las playas, erosión, estabilidad y régimen hidrodinámicos, y el daño por la recolecta del sargazo en playa.

4. CONTENCIÓN, RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN

La recolección en playa es un escenario no deseable que debe ser prevenido. Si se logra un manejo sostenible del sargazo, éste no llegaría en cantidades masivas a las playas. Cuando el sargazo llega en bajas cantidades a la playa se degrada por la vía aeróbica y no genera complicaciones. El problema surge como resultado de la acumulación masiva de sargazo en la playa y el agotamiento del oxígeno por la alta demanda y la inducción de descomposición por vía anaeróbica. El sargazo por sí mismo no es un problema, pero sí lo es la acumulación masiva en la playa. Por lo tanto, el esfuerzo debe priorizarse en la recolección de sargazo en el mar, reduciendo el arribo masivo a la playa y su subsecuente descomposición anaeróbica. Estos esfuerzos deben estar guiados por el sistema de alerta temprana. Por un lado, se pueden dirigir esfuerzos de contención en mar abierto con la intención de evitar que el sargazo rebase la barrera arrecifal. Otra opción es la recolección en aguas más cercanas a la costa (en las lagunas arrecifales). La determinación de sitios prioritarios de atención podría ser definida con base en los resultados de los pronósticos.

4.1. Contención y recolección del sargazo en el mar

El esfuerzo debe priorizarse en la recolección de sargazo en el mar, evitando el arribo masivo a la playa y el subsecuente inicio del proceso de descomposición anaeróbica. Estos esfuerzos deben estar guiados por el sistema de alerta temprana. Por un lado, se pueden dirigir esfuerzos de contención en mar abierto con la intención de evitar que el sargazo rebase la barrera arrecifal. Otra opción es la recolección en aguas más cercanas a la costa (en las lagunas arrecifales). La determinación de sitios prioritarios de atención podría ser definida con base en los resultados de los pronósticos. El objetivo es que a partir de la colecta de sargazo antes de acumularse en la playa, se genere un cambio completo, y el sargazo sea visto como un recurso biótico sujeto a aprovechamiento, más que un problema en las playas.

- 4.1.1. Estudiar los impactos de diferentes técnicas de recolecta sobre la fauna asociada y los ecosistemas costeros.
- 4.1.2. Analizar el costo-beneficio-impacto de distintas soluciones y de la capacidad de recolección y volumen de diferentes tecnologías, tanto para la recolección en embarcaciones, como la contención en barreras y el desvío hacia zonas específicas de recolección.
- 4.1.3. Detonar procesos de desarrollo tecnológico y de transferencia tecnológica sobre equipamiento de embarcaciones, métodos de contención y colecta.
- 4.1.4. Analizar el costo-beneficio-impacto de las distintas embarcaciones sargaceras que se utilizan para la colecta en la laguna arrecifal de Quintana Roo, así como, rutas de navegación, sitios adecuados para la recolección y el equipamiento adecuado para la primera etapa del procesamiento del sargazo.
- 4.1.5. Realizar un dictamen técnico de eficiencia para el tipo de barreras que deben usarse para contener el sargazo en el mar considerando:
 - a. Condiciones del oleaje.
 - b. Método de instalación y anclaje.
 - c. Mantenimiento y supervisión del funcionamiento útil.
 - d. La evaluación del impacto que tienen las actividades de colecta sobre las comunidades marinas asociadas.

- e. La colocación en mar abierto.
- 4.1.6. Sistematizar el monitoreo de las acciones que se llevan a cabo con el objetivo de integrar toda esta información en una base de datos útil que permita entender la variabilidad espacial y temporal de este fenómeno con datos confiables e intercomparables.

4.2. Recolección del sargazo en la playa

La recolección en playa es un escenario no deseable que se debe ser prevenido. Si se logra un manejo sostenible del sargazo este no llegaría en cantidades masivas a las playas. Cuando el sargazo llega en bajas cantidades a la playa se degrada por la vía aeróbica y no genera complicaciones. El problema surge como resultado de la acumulación masiva de sargazo en la playa y el agotamiento del oxígeno por la alta demanda y la inducción de descomposición por vía anaeróbica. El sargazo por sí mismo no es un problema, pero si lo es la acumulación masiva en la playa. Por lo tanto, los esfuerzos deben priorizarse en la recolección en mar abierto o al inicio de la laguna arrecifal para evitar que el sargazo llegue a las playas.

- 4.2.1. Analizar las posibles soluciones para la recolección manual y con maquinaria.
- 4.2.2. Detonar procesos de desarrollo tecnológico y de transferencia tecnológica de las mejores prácticas para recolectar el sargazo.
- 4.2.3. Sistematizar el monitoreo de las acciones de colecta que se llevan a cabo en la playa con el objetivo de integrar toda esta información en una base de datos útil que permita entender la variabilidad espacial y temporal de este fenómeno con datos confiables e intercomparables.
- 4.2.4. Desarrollar y actualizar los lineamientos para la recolección en la laguna arrecifal y en la playa, así como los instrumentos jurídicos vigentes (EIA) para minimizar los impactos ambientales asociados, considerando:
 - a. Los lineamientos vigentes.
 - b. Los métodos de colecta.
 - c. Las características de la maquinaria empleada.
 - d. El pre-tratamiento y manejo en tierra.

4.3. Disposición temporal y final del sargazo

Las zonas de disposición deben estar debidamente preparadas para evitar contaminación por lixiviados, si es que estos fueran tóxicos. El sargazo debe permanecer únicamente a la espera de su distribución o transformación.

- 4.3.1. Analizar la composición química de lixiviados y gases producidos durante la descomposición del sargazo, con el objetivo de seleccionar y diseñar sitios de disposición adecuados.
- 4.3.2. Determinar y cuantificar los metales pesados asociados al sargazo y su variación espacio-temporal, y su impacto en los diferentes usos del sargazo. Analizar si la presencia de metales pesados proviene de otras fuentes de contaminación.
- 4.3.3. Establecer procedimientos para destinar y/o establecer nuevos sitios de disposición de sargazo.

- 4.3.4. Desarrollar protocolos dentro de los sitios de disposición con el objetivo de minimizar la generación de lixiviados.
- 4.3.5. Determinar el mejor método para disponer del sargazo en tierra, minimizando los impactos asociados al suelo, la población, el acuífero y el entorno.
- 4.3.6. Desarrollar protocolos de limpieza de playas evaluando esquemas de uso rotativo.
- 4.3.7. Evaluar los costos y capacidad de procesamiento, en volumen, de plantas de secado y prensado del sargazo para su almacenaje como material seco y sólido (ladrillo o láminas).
- 4.3.8. Determinar las etapas y mejores prácticas para el transporte del sargazo a los sitios de transferencia, considerando una etapa de pre-tratamiento del sargazo para reducir el costo de transportación (por ejemplo, densificación-molienda o secar-prensar).

5. APROVECHAMIENTO Y USOS

5.1. Aprovechamiento sustentable e innovación

Se requiere establecer públicamente y de forma clara que el sargazo puede ser sujeto a aprovechamiento sustentable y que debe ser regulado. En la actualidad se están ejerciendo los recursos públicos para la remoción de sargazo que de una u otra forma se convierte en un pasivo ambiental. Por lo tanto, es deseable el aprovechamiento regulado y sustentable de sargazo como materia prima industrial para muchos sectores económicos. En este sentido se debe incentivar el desarrollo tecnológico asociado al aprovechamiento sustentable del sargazo, tanto para uso local como regional, asimismo la generación de cadenas de valor.

Además se requiere identificar y validar la factibilidad técnica de los usos reales y potenciales del sargazo, así como desarrollar la investigación científica necesaria para descartar diversos grados de contaminación por metales pesados o alguna otra que impida su uso. Ambas acciones deben ser el punto de partida para definir las cadenas de valor y determinar la factibilidad económica del procesamiento para su comercialización. Esto permitiría que el papel del Estado Mexicano sea estrictamente regulatorio, y que no se gasten recursos públicos en su remoción y disposición.

- 5.1.1. Impulsar el desarrollo de técnicas de pre-procesamiento que faciliten la conservación de sargazo. Considerando que hay una alta viabilidad interanual en el arribo, la industria requiere de procesos de conservación de la materia prima para mantener su producción.
- 5.1.2. Evaluar los costos de construcción y funcionamiento de plantas de secado y prensado del sargazo, analizando los volúmenes de sargazo que se pueden manejar por día y por planta de tratamiento.
- 5.1.3. Evaluar las tecnologías disponibles a través de contratos de licenciamiento, asimilación o reproducción de patentes de proceso vigentes o expiradas.
- 5.1.4. Crear innovación tecnológica de última fase orientada al escalamiento de tecnologías probadas.
- 5.1.5. Generar prototipos de escala preindustrial, industrial y comercial.
- 5.1.6. Registro de patentes de proceso y uso que vayan acompañadas de contratos de licencia parcial o total de la tecnología para el sector productivo privado.

- 5.1.7. Realizar estudios orientados al establecimiento de normatividad, normalización y métodos de prueba.
- 5.1.8. Generar estudios de factibilidad técnica económica derivados de las tecnologías asociadas y, además, sistemas de análisis o métodos analíticos innovadores asociados a la inocuidad, riesgo microbiológico, toxicológico y caracterización de composición.
- 5.1.9. Determinar la composición bioquímica del sargazo (proteínas, carbohidratos, lípidos, fibras) y la respuesta a distintas condiciones para evaluar su potencial para consumo.
- 5.1.10. Realizar estudios de funcionalidad ecológica, agrícola, ecosistémica, alimentaria, nutricional, mecánica y de productos generados a partir de sargazo.
- 5.1.11. Realizar estudios asociados de riesgo ecológico, hidrológico, hidrogeológico, de procesos y productos generados a partir de sargazo.

5.2. Usos industriales potenciales

La captura de sargazo fresco ya sea en mar abierto, en barreras de contención o la laguna arrecifal permite explorar una amplia gama de uso y aprovechamiento que se puede dar al sargazo. Por el contrario, es muy probable que el destino final del sargazo recolectado en playa en proceso de descomposición sea el de generación de energía por medio de metanogénesis en combinación con otros residuos orgánicos, y también como composta para la fertilización de cultivos agrícolas. En el caso de la colecta de sargazo fresco es muy importante que se establezcan protocolos para el procesamiento del sargazo en la embarcación, evitar la generación de lixiviados y aumentar el potencial económico. Entre los posibles usos industriales del sargazo que pueden ser explorados se encuentran:

- 5.2.1. Explorar la generación de bienes ecosistémicos a partir de sargazo:
 - a. Explorar opciones que contribuyan a mejorar la calidad, productividad y sanidad de los suelos de la zona, así como de suelos de zonas áridas.
 - b. Desarrollar procesos de producción de aplicación agrícola de alto valor agregado, microbiológica, fisicoquímica y nutricional.
 - c. Exploración de nuevos usos.
- 5.2.2. Explorar la generación de energía a partir del sargazo:
 - a. Digestión anaeróbica y metanogénesis.
 - b. Quema directa, bioenergía y carbonización hidrotérmica (opción con baja eficiencia).
 - c. Bio-combustible derivado de fermentación o biotransformación (bioetanol, biodiesel y bioturbosina).
 - d. Extracción de aceites biocombustibles de biomasa algal.
 - e. Exploración de nuevos usos.
- 5.2.3. Explorar la obtención de alimento animal y humano a base de sargazo:
 - a. Formulación y mezclado.
 - b. Estabilización físico-química.

- c. Análisis de riesgo de preparaciones alimenticias y nutricionales por métodos fisicoquímico, microbiológico, toxicológico. Considerar normatividad asociada (requiere de análisis químico para metales, metales pesados, grasas y aceites, cromatografía de gases y toxicología).
- d. Proceso agro-industrial del sargazo.
- e. Bio-refinación y fraccionamiento (sacarificación por hidrólisis química y enzimática de la biomasa).
- f. Separación de metales tóxicos.
- g. Aplicaciones en nutrición avanzada de animales y humanos.
- h. Aprovechamiento para maricultura y acuicultura.
- i. Exploración de nuevos usos.

5.2.4. Explorar la generación de bienes especializados derivados del sargazo:

- a. Fomentar la generación de una industria de especialidades químicas y precursores químicos (ácidos orgánicos, alcoholes primarios y otros metabolitos derivados de conversión biológica).
- b. Obtener compuestos bioactivos de alto valor, moléculas parcial o totalmente purificadas (pigmentos, aminoácidos, proteínas, uronatos, gelificantes, prebióticos, entre otros) para la industria farmacéutica, cosmética, nutricional, entre otras.
- c. Fomentar la generación de industria asociada con empleos de mayor vigencia y nivel de profesionalización.
- d. Bio-materiales para la industria textil, del calzado y de la construcción, entre otras.
- e. Generar bio-polímeros a partir de procesos de extracción, sacarificación de la biomasa del sargazo y fermentación de los azúcares obtenidos hacia monómeros tales como ácido láctico o succínico.
- f. Explorar nuevos usos.

6. RESTAURACIÓN

6.1. Restauración de ecosistemas, rehabilitación y recuperación de la zona costera

Los ecosistemas costeros afectados por las arribazones masivas de sargazo, playas, pastos marinos, arrecifes, requieren restaurarse para recuperar los servicios ecosistémicos que se pierden y de los cuales la sociedad se beneficia. Las acciones de restauración requieren de conocimiento científico que permita conocer si la arribazón de sargazo en las playas y aguas someras llegará a controlarse. Este conocimiento permitirá implementar un plan de restauración de los ecosistemas impactados.

- 6.1.1. Definir las acciones necesarias para la restauración y rehabilitación de los ecosistemas a corto, mediano y largo plazo.
- 6.1.2. Desarrollar estrategias locales de manejo costero integrado con base en la restauración de ecosistemas costeros.
- 6.1.3. Realizar estudios basados en análisis de procesos costeros derivados del impacto del sargazo en la costa y su remoción no controlada y donde se perdieron las praderas de los pastos marinos:
 - a. Análisis dinámico de playas.
 - b. Recuperación de la dinámica litoral (estudios topo-batimétricos).
 - c. Extracción de arena de bancos autorizados, transporte y vertido de arena.
 - d. Reforestación de las dunas costeras.

- e. Restauración de corales.
- f. Restauración de praderas de pastos marinos.

7. NORMATIVIDAD

La regulación de las actividades asociadas al sargazo requiere la implementación de un instrumento de política ambiental para el manejo integral de la zona costera y oceánica. El categorizar al sargazo como un recurso biótico sujeto a aprovechamiento, así como los criterios y lineamientos para su uso a nivel industrial requiere de instrumentos jurídicos nuevos.

7.1. Marco legal para la contención, la recolección, la disposición, el procesamiento y el uso industrial del sargazo

Se requiere del análisis de marco jurídico vigente aplicable e identificar y desarrollar la normativa necesaria para la contención, recolección, disposición, procesamiento y uso del sargazo, así como las actividades asociadas.

- 7.1.1. Desarrollar y actualizar los instrumentos jurídicos y lineamientos para regular las diferentes etapas del manejo del sargazo considerándolo tanto como un recurso biótico de la Nación o como residuo dependiendo del estado de descomposición. Se requiere el establecimiento de métodos y sistemas autorizados que puedan ser dictaminables por expertos y normados en Comisiones Nacionales y evaluados mediante procedimiento de evaluación de impacto ambiental. Para ello se considera:
 - a. La colecta en mar abierto como recurso biótico no contaminante, no tóxico, pero sí excedente, y por lo tanto sujeto de explotación bajo permiso y regulación de la autoridad federal y local.
 - b. Los impactos que deberán ser evaluados al analizar las metodologías propuestas.
 - c. Las características que deberían tener las embarcaciones sargaceras.
 - d. Las características que deberían tener las barreras de contención en mar abierto para evitar su ingreso a los ecosistemas costeros.
 - e. Las rutas de navegación.
 - f. Los sistemas y sitios de anclaje de las barreras.
 - g. Los sitios de recolección (puede ser en base a las corrientes y monitoreo remoto)
 - h. La recolección en mar para minimizar el impacto ambiental a los ecosistemas costeros y a la salud humana.
 - i. La composición de los lixiviados generados por el procesamiento dentro de las embarcaciones.
 - j. El procesamiento necesario para su uso industrial y sus condiciones.
 - k. Determinar el mejor método para transportar, almacenar y disponer el sargazo en tierra, minimizando los daños colaterales a suelos, población, entorno, etc.
 - l. La disposición temporal y final del sargazo recolectado.
 - m. Dar seguimiento y monitoreo de variables ambientales en los sitios de disposición.

7.2. Ordenamiento ecológico marino-costero del Caribe mexicano

Con el objetivo de regular las actividades asociadas al sargazo se requiere implementar un instrumento de política ambiental para el manejo integral de la zona marino-costera, considerando que el sargazo arriba de manera diferencial a las costas de Quintana Roo. La atención se ha centrado principalmente en las zonas de importancia turística, sin embargo, la acumulación de

biomasa podría estar generando severos problemas en zonas desatendidas. Es urgente una regionalización costera para enfocar esfuerzos considerando ecosistemas, áreas naturales protegidas, desarrollo social, zonas urbanas y turísticas.

- 7.2.1. Implementar el componente marino del Programa de Ordenamiento Ecológico Marino y Regional del Golfo de México y Mar Caribe (24/11/2012).
- 7.2.2. Identificar los sitios adecuados para la disposición final del sargazo recolectado con base en análisis espaciales multicriterio.

8. COMUNICACIÓN Y EDUCACIÓN

8.1. Desarrollo de estrategias de comunicación y educación ambiental

Es imperante elaborar una estrategia de comunicación y educación ambiental para informar a la población sobre el fenómeno de las arribazones masivas de sargazo, posibles impactos, usos y normas de aprovechamiento y disposición.

- 8.1.1. Diseñar una estrategia de comunicación para informar a la población acerca de los aspectos físicos, biológicos, sociales, culturales y económicos, asociados al sargazo, destacando que es un recurso biótico que puede ser aprovechado para la elaboración de diferentes bienes de consumo.
- 8.1.2. Elaborar materiales para diversas audiencias con el fin de difundir entre la población (por segmentos de edades) la importancia de su participación en la prevención del deterioro ambiental, en especial de los problemas relacionados con la contaminación de los mares y las costas del Caribe mexicano.
- 8.1.3. Diseñar una cultura de cuidado a los océanos para que los sectores de turismo, de servicios y la sociedad en su conjunto contribuyan a reducir la contaminación ambiental y en especial la de los mares y costas.
- 8.1.4. Diseñar una estrategia para difundir las leyes, reglamentos, normas y lineamientos que rigen el aprovechamiento de los recursos marinos y la preservación de la costa, mar y océano.

9. COOPERACIÓN INTERNACIONAL

9.1. Colaboración internacional para la atención del sargazo en el Gran Caribe

La colaboración internacional tiene una importancia incuestionable, pues se trata de un reto que traspasa fronteras. Es fundamental la conformación de un consorcio de países de la región que busque el establecimiento de tratados internacionales para la regulación de la contaminación que llega a los mares y que incentiva el incremento masivo del sargazo. Además se requiere establecer proyectos de colaboración entre los países de la región para generar capacidades locales y regionales, promover la transferencia de tecnología, el intercambio de experiencias y todas aquellas acciones que permitan enfrentar este reto de manera coordinada internacionalmente.

- 9.1.1. Generar la agenda de colaboración en el Caribe optimizando que el sargazo capture CO₂ y la cosecha de sargazo previo a su arribo de la playa mitigue la producción de generación de CO₂.
- 9.1.2. Promover la cooperación internacional para:
 - a. Generar capacidades locales y regionales.
 - b. Transferencia tecnológica.
 - c. Intercambio e interoperabilidad de bases de datos.
 - d. Intercambio de experiencias.
 - e. Verificación de los cumplimientos de los objetivos de desarrollo sustentable y metas de Aichi.
 - f. Crear una Plataforma única de visualización Web que integre todas las disciplinas.
 - g. La Década de los océanos para el Desarrollo Sostenible 2021-2030
- 9.1.3. Promover la creación de una gran instalación oceanográfica experimental internacional para el estudio de procesos oceánicos y costeros.