



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de los patrones hidrodinámicos
asociados a las arribazones masivas de
sargazo a las costas mexicanas**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Ximena Kitain Hamilton

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Valeria Chávez Cerón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Dedicatoria

Dedico esta tesis a:

Mis padres, por siempre apoyarme en mis sueños y mostrarme lo hermosa que puede ser la vida. A mi madre por siempre estar a mi lado y acompañarme en todo este camino; y a mi padre porque vive en mí y sé lo orgulloso que estaría, está, por verme concluir esta etapa de mi vida.

A mis amigos, compañeros de carrera, con los que compartí tantas desveladas y maratones de estudio. Además de todo el apoyo y trabajo en equipo que compartimos, impulsándome a aprender y crecer profesionalmente.

A mi mejor amiga que siempre está presente, me alienta y escucha cuando lo necesito, además de creer en mí.

Finalmente, a mis abuelos que siempre estarán en mi corazón y sé lo orgullosos que estarían.

Agradecimientos

Agradezco a la UNAM por ser mi casa de estudios, enseñarme tanto y prepararme para la vida profesional. Agradezco a todos mis profesores que se esforzaron en darme una buena enseñanza y además compartieron sus experiencias laborales con nosotros los alumnos.

Agradezco al Instituto de Ingeniería, en específico al Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de estudio/investigación. Agradezco todos los conocimientos que me otorgaron, además de las muchas herramientas que hicieron de mi conocimiento, las cuales me servirán en la vida profesional.

Quiero expresar mi gratitud a CEMIE-Océano por dejarme colaborar en uno de sus proyectos y darme la oportunidad de buscar una mejoría para la problemática en cuestión.

Agradezco a mi tutora, la Dra. Valeria Chávez Cerón, por ser mi guía en este trabajo y por darme la oportunidad de trabajar con ella; agradezco todos los conocimientos que me dejó, además de las técnicas y tácticas que me enseñó para ser más eficiente. Agradezco el tiempo y disposición que me dedicó, contribuyendo en el resultado de mi tesis.

Finalmente, agradezco a mis padres por darme la oportunidad de tener una buena educación e impulsarme a ser mejor cada día. Recordando siempre buscar algún significado a nuestra existencia y disfrutar de la vida y las enseñanzas que ésta nos deja.

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 1 |
| a) Justificación | 8 |
| b) Objetivos | 9 |
| i. Objetivo general | 9 |
| ii. Objetivos particulares | 9 |
| I. Marco teórico | 10 |
| a) Estado del arte..... | 10 |
| a.1) Dinámica del sargazo en el Mar Caribe..... | 10 |
| i. Corrientes superficiales y su relación con el sargazo..... | 10 |
| ii. Vientos superficiales y su relación con el sargazo | 11 |
| iii. Efecto de la fisiología del sargazo | 12 |
| iv. Cantidades de sargazo que arriban a las costas..... | 13 |
| a.2) El sargazo en el Caribe Mexicano | 14 |
| i. Patrones de circulación en la cuenca del Caribe Mexicano | 14 |
| ii. Dinámica del sargazo en la costa del Caribe Mexicano | 14 |
| a.3) Herramientas de análisis y visualización de datos | 16 |
| i. Análisis de patrones de sargazo con ayuda de imágenes satelitales..... | 16 |
| ii. Plataformas virtuales de consulta | 18 |
| II. Metodología | 21 |
| a) Zona de estudio | 21 |
| b) Hidrodinámica local asociada a las arribaciones masivas de sargazo..... | 25 |
| i. Datos de reanálisis numérico | 25 |
| ii. Análisis de las fechas de interés | 25 |
| iii. Modelación numérica de la hidrodinámica local asociada | 26 |
| III. Resultados y Discusión | 28 |
| a) Datos de reanálisis numérico | 28 |
| b) Identificación de fechas de interés | 30 |
| c) Clima marítimo de las fechas de interés..... | 30 |
| i. Parámetros estadísticos..... | 34 |
| a) Modelación numérica de la hidrodinámica local asociada en las fechas de interés | |
| 37 | |
| IV. Conclusiones y futuras líneas de investigación | 42 |

| | |
|--|----|
| Referencias | 44 |
| Anexos | 46 |
| Anexo 1: La problemática de las arribazones masivas de sargazo en México | 46 |
| Características biofísicas del sargazo | 46 |
| Origen de la problemática del sargazo, hallazgos y cifras | 50 |
| Sargazo y turbidez del agua | 52 |
| Anexo 2: Tablas comparativas de distintos parámetros del oleaje entre datos de la NOAA y el Era5 | 54 |
| Dirección del viento (°) | 54 |
| Velocidad del Viento (m/s) | 57 |
| Altura de ola significativa (m)..... | 60 |
| Periodo pico (s)..... | 62 |
| Dirección del oleaje (°) | 65 |
| Anexo 3: Lista de tablas y figuras | 68 |

Introducción

El sargazo es un conjunto de algas marinas que cumplen funciones ecológicas importantes. Las especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* (Figura 1) son organismos flotantes que han arribado de forma masiva a las playas del Caribe, incluyendo a las de México ([Carabias Lillo, Provencio, de la Maza Elvira, Gutiérrez Carbonell, & Gómez Cruz, 2000](#); [CONACYT, 2019](#)). Se considera que el Golfo de México es la fuente dominante de sargazo hacia el Atlántico.



Figura 1. (a) *Sargassum fluitans* <https://www.naturalista.mx/taxa/134103-Sargassum-fluitans>;
(b) *Sargassum natans* <https://panama.inaturalist.org/taxa/134104-Sargassum-natans>

Las arribaciones masivas son un reto que ha de ser tratado por un panel multidisciplinario, de manera integral y con una debida planeación y ejecución de las acciones pertinentes para evitar los daños causados por el sargazo ([CONACYT, 2019](#)). Es preciso tener en cuenta que el sargazo no sigue un patrón marcado para su arribo, es intermitente y su

llegada se asocia a los meses de mayo a septiembre, según datos de años posteriores ([CONACYT, 2019](#)). En la Figura 2, se muestra la densidad del sargazo registrada en el mes de julio, desde el año 2013, hasta el año 2018. Aquí se puede apreciar su variabilidad en el tiempo ([CONACYT, 2019](#)).

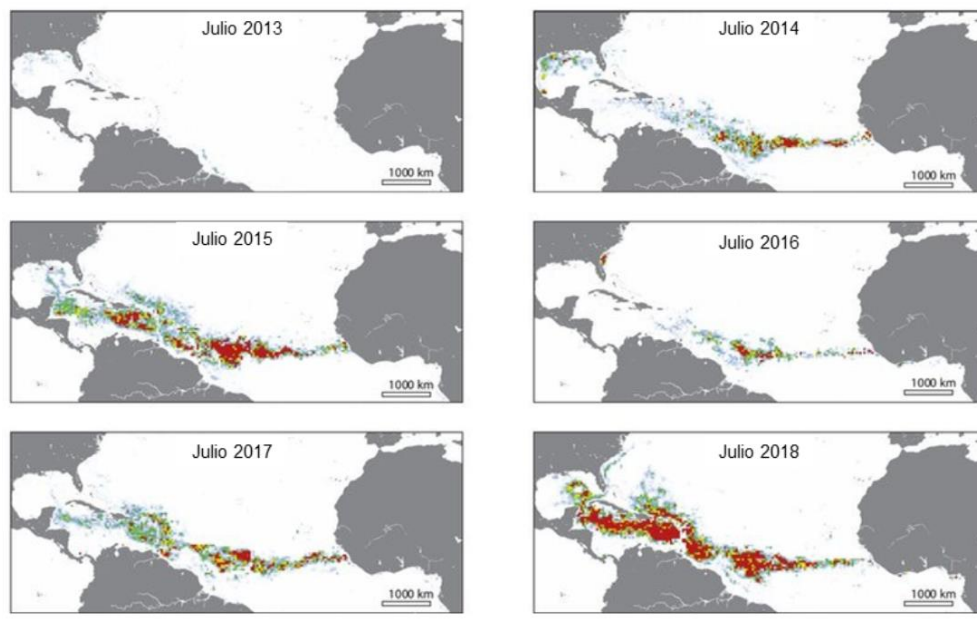


Figura 2. Densidad de sarazo durante el mes de julio de los años 2013 – 2018. Los colores cálidos representan mayor densidad y los colores fríos menor densidad de sargazo ([Wang et al., 2019](#)), ([CONACYT, 2019](#))

El sargazo forma parte del hábitat para diversas especies marinas, tanto animales como vegetales, además de contar con especies endémicas ([Chávez et al., 2020](#)). Para las tortugas, sirve como refugio y para crianza, además de para su proceso migratorio. En la costa, sirve como proveedor de alimento y nutrientes para los ecosistemas costeros. En resumen, el sargazo se considera benéfico para la biodiversidad marina ([Aquilera, 2016](#)) ya que cumple con funciones ecológicas importantes. Estas funciones van desde ofrecer áreas de descanso, reproducción y alimentación([CONACYT, 2019](#)), hasta el transporte de la biodiversidad, tanto para otras especies, como para nutrientes (entre las costas oeste y este del Atlántico), fungiendo como un vector de conectividad, fomentando el intercambio genéticos de cientos de especies ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Cada balsa de sargazo conforma una entidad única por su conformación biótica, sus relaciones tróficas y sus procesos ecológicos. En costa, al descomponerse el sargazo, provee nutrientes a las dunas, estabilizando las playas. Puede servir como fertilizante para el arena de las dunas y como protector de la línea de costa ([Hu et al., 2016](#)). Sin embargo esta descomposición puede traer aspectos negativos que se discutirán a continuación, sobre todo en grandes volúmenes ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Desde el año 2011, se han observado acumulaciones masivas de esta macroalga en el Atlántico, formando cadenas de hasta 8'850 km de longitud para el año 2018. Estas grandes acumulaciones crearon lo que se conoce como el "Gran Cinturón de Sargazo", con una biomasa de 20 millones de toneladas, aproximadamente ([CONACYT, 2019](#)). La reproducción de sargazo se ha salido de los límites deseados, esto se puede deber en gran medida al cambio climático (aumento de la temperatura de los océanos) y a acciones antropogénicas que alteran el ambiente (como la contaminación de los mares al producir un exceso de nutrientes disponibles en el mismo, entre otras acciones).

El Gran Cinturón de Sargazo se origina en la costa de África occidental y es desplazado por corrientes marinas hacia América. Estas macroalgas encuentran condiciones favorables para su crecimiento por la precipitación de polvo proveniente del desierto del Sahara y la gran cantidad de nutrientes y materia orgánica que encuentran a su paso hacia el caribe (donde se topan con las desembocaduras de los ríos Amazonas y Orinoco, en América del Sur, hasta ser arrastradas hacia el norte a través del Mar Caribe) ([Berinstain, enero-abril 2019](#)), ([CONACYT, 2019](#)).

Al flotar estas balsas de sargazo en alta mar, no sólo sirven como refugio de flora y fauna sino que sirven como depósito de desechos, al transportar desechos plásticos de hidrocarburos que ensamblen en el camino ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)). Cabe destacar que en los últimos 10 – 15 años ha habido ciertos accidentes por derrame de hidrocarburos en el mar. Estos accidentes crean afectaciones severas de forma directa, y las balsas de sargazo ayudan a expandir el daño además de hacerlo más duradero ([Calzada & Marín-Antuña, 2004](#)). Por tal motivo, las balsas de sargazo se convierten en un ecosistema altamente susceptible a la contaminación marina, fomentando a su vez el cambio climático ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Al ser estas masas de sargazo transportadas por corrientes marinas a las costas, causan daños tanto a los ecosistemas costeros (erosión de playas), como a la pesca, al tráfico de barcos (interponiéndose en su camino) y al turismo. Así repercute negativamente en las economías de las comunidades costeras ([Putman, Lumpkin, Olascoaga, Trinanes, & Goni, 2020](#)). El sargazo acumulado en la playa se descompone produciendo ácido sulfhídrico que emite un intenso olor fétido y puede alcanzar niveles serios de toxicidad para los humanos ([CONACYT, 2019](#)).

Como ejemplo de los daños ya hechos por grandes volúmenes de sargazo, se encuentra la segunda barrera arrecifal más grande del mundo, el Sistema Arrecifal Mesoamericano, donde tanto el arrecife, como las praderas marinas se ven seriamente afectadas debido a que la capa de sargazo sobre la superficie del agua impide el paso de la luz, además de que su descomposición reduce la concentración de oxígeno disuelto en el agua ([CONACYT, 2019](#)).

Se enfatizan problemáticas como modificación en la calidad del agua cerca de la línea de costas, y una posible eutrofización total o parcial, dañando a las especies ya

existentes que demandan ciertos rangos de iluminación y oxígeno, entre otros parámetros.

Entonces, la concentración de sargazo en las costas recibe el nombre de “marea marrón”; que ponen en peligro a los ecosistemas locales. Sus efectos incluyen la reducción de la luz, el oxígeno (hipoxia o anoxia, falta casi total de oxígeno en la sangre o en tejidos corporales, según la RAE) y el pH. La afluencia mensual de nitrógeno y fósforo por el *Sargassum* spp. a la deriva se estimó en 6´150 y 61 kg/km respectivamente, lo que provoca la eutrofización. Las praderas marinas cercanas a la costa dominadas por *Thalassia testudinum*, o hierba de tortuga (hábitat de varias especies de moluscos y crustáceas, que demanda una iluminación intensa), fueron sustituidas por una comunidad dominada por algas calcáreas rizofíticas y algas y/o epífitas a la deriva, lo que supuso una pérdida del 61,6-99,5% de la biomasa subterránea ([Van Tussenbroek et al., 2017](#)).

El sargazo al descomponerse produce lixiviados, los cuales causan de igual manera, daño a los ecosistemas costeros alterando ciertos parámetros; como lo son las concentraciones de amonio. Si los lixiviados llegaran a mezclarse con los mantos freáticos, podría traer severas consecuencias de ser estas aguas utilizadas para actividades antropogénicas, además de potenciales daños como dermatitis por contacto directo ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)), ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)).

El agotamiento de oxígeno disuelto, y las reducciones de pH y de luz, producen un aumento en la turbidez del agua y un aumento en su temperatura ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)). Aunado a esto se encuentra la producción de compuestos con potencial tóxico como el amonio (NH₄) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S). ([van Tussenbroek et al., 2017](#); [CabanillasTerán et al., 2019](#); [Rodríguez-Martínez et al., 2019](#); [AntonioMartínez et al., 2020](#); [Chávez et al., 2020](#)). Asimismo, se ha reportado que el *Sargassum* pelágico contiene en sus tejidos metales pesados como: As, Ca, Cl, K, Mn, P, Rb, S, Si, Sr, Th y U, con arsénico (que puede ser tóxico) en altas concentraciones (24-172 ppm) ([Rodríguez-Martínez et al., 2020](#)).

Todas estas implicaciones en la calidad del agua causan la muerte de pastos marinos, así como daños a los arrecifes de coral y a la fauna existente, en mayor parte a las especies que habitan las lagunas de arrecifes ([Van Tussenbroek et al., 2017](#)). La pérdida de los pastos marinos trae severas repercusiones a la protección de la costa y la claridad del agua, sin ellos, las playas se vuelven menos estables y por lo tanto, más vulnerables a impactos de tormentas y huracanes ([Aguilera, 2016](#)).

A continuación, la Figura 3, representa un esquema del movimiento del sargazo una vez que arribó a la línea de costa:

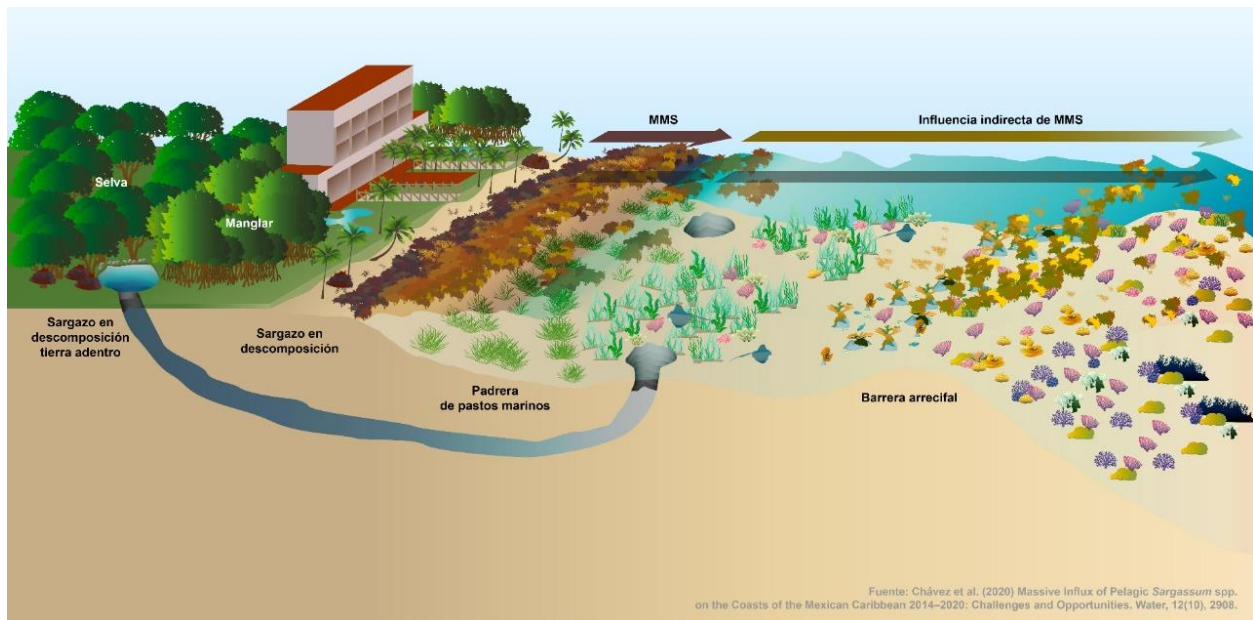


Figura 3. Representación esquemática del perfil de la costa del Caribe mexicano y los impactos de la afluencia de sargazo (Chávez et al., 2020).

Los ecosistemas costeros incluyen: el arrecife de coral (zonas de fondo, cresta y proa); las praderas de pastos marinos, las algas y la fauna bentónica aislada (laguna arrecifal); la playa; el manglar; el bosque; y los ríos subterráneos (Chávez et al., 2020). Cuando el sargazo flotante llega a la playa, si se deja en el sitio, se descompone después de un par de días, generando lixiviados y materia orgánica que llegan al mar por la acción de las olas, creando mareas marrones, como ya se mencionó previamente, que pueden afectar a la flora y la fauna cercanas a la costa, directamente, y al arrecife de coral, indirectamente. La eliminación inadecuada de los sargazos en los manglares y bosques puede contaminar los ríos subterráneos que acaban llegando al mar (Chávez et al., 2020).

Por otro lado, la industria del turismo se ve afectada pues el sargazo en descomposición no es atractivo a la vista, además de producir olores. Además, el sargazo en las costas puede afectar la salud humana. Grandes volúmenes de esta macroalga en descomposición producen grandes cantidades de biomasa, y la producción de gases (como amonio y ácido sulfúrico) que en exposición crónica y en ciertas concentraciones se vuelven tóxicos. El sargazo y otras algas absorben metales pesados y otros elementos, los cuales de igual manera son tóxicos en altas concentraciones (Aguilera, 2016). De aquí nace la idea que varios humedales pueden servir para “purificar” en cierto grado el agua pues retiran los metales pesados de esta.

La afectación a la industria del turismo implica una problemática en la economía nacional, ya que solo el destino turístico de Cancún genera alrededor del 1.5 % del producto interno bruto (PIB); siendo éste un porcentaje importante para México (Rivera-Arriaga et al., 2020).

La amplia urbanización y la construcción de infraestructuras turísticas han provocado importantes cambios en el uso del suelo, el desplazamiento de las dunas y la vegetación costera y la deforestación ([Chávez et al., 2020](#)). Esto agrava el problema ya existente que genera el sargazo por sí solo.

Otro aspecto importante para las arribaciones masivas de sargazo, son las condiciones que los arrastra hasta las costas. Se ha identificado que las olas y los vientos de energía relativamente baja se asocian con la llegada de estas masas de sargazo ([Rutten et al., 2021](#)). Además, se ha comprobado que el tamaño de la alfombra de sargazo cerca de la costa disminuye con la disminución de la energía de las olas y el viento. Una vez que el sargazo llega a las playas, se forma una berma de sargazo. Sin embargo la eliminación natural de las algas es posible al ser los niveles de agua elevados, aunados a un aumento en la acción de las olas, devolviéndolas a la columna de agua ([Rutten et al., 2021](#)). Se ha observado la eliminación natural de las algas cuando los niveles de agua son elevados y la acción de las olas aumenta.

Se ha sugerido que la variabilidad temporal está relacionada con la variabilidad de las corrientes, los vientos, las temperaturas de la superficie del mar, los nutrientes y el ciclo de vida del sargazo ([Johns et al., 2020](#); [Wang et al., 2019](#)). Presumiblemente, la dinámica oceánica del sargazo se refleja en los eventos de varada ([Rutten et al., 2021](#)).

Concluyendo, si las grandes masas no arribaran a las costas, o el arribo fuera de pequeñas cantidades de sargazo, el daño ecológico sería menor; el problema se vuelve de gran importancia ante la magnitud de los volúmenes de sargazo ya que, el destino final del mismo es un gran reto de administración pública pues puede a su vez convertirse en un problema de salud, bienestar social y desempleo ([Chávez et al., 2020](#)).

La capacidad de recuperación de los ecosistemas costeros del Caribe se ha visto alterada en los últimos 50 años debido a la inadecuada gestión costera de los desarrollos urbanos y turísticos, la sobrepesca y, más recientemente, la masiva afluencia de sargazo ([Chávez et al., 2020](#)). Por dicho motivo, las arribaciones masivas de sargazo pueden ser consideradas como un desastre natural, por todos los daños que ocasionan ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Es inevitable actuar ante tal situación. Para esto, existe un lineamiento específico para el bloqueo y retiro del sargazo en la zona marina. Se pueden utilizar barreras físicas para evitar el paso del sargazo, un sistema similar se utiliza al haber derrames de hidrocarburos, con ciertas modificaciones. Al haberse acumulado una cantidad basta en las barreras, el sargazo es transportado con barcos de arrastre hacia la corriente del Golfo de México, para que el sargazo sea trasladado por dicha corriente hacia mar adentro, alejándose de las costas ([Berinstain, enero-abril 2019](#)).

Es de gran importancia seguir los lineamientos específicos, pues el retiro de las grandes masas de sargazo de forma inadecuada, puede desembocar problemas ecológicos. Entre estos problemas se encuentran las mareas marrones de sargazo, la contaminación de los acuíferos y daño a la población de tortugas marinas pues la acción de retirar el

sargazo implica la utilización de maquinaria pesada, lo cual compacta las playas, dificultando el proceso de anidación de las tortugas ([Chávez et al., 2020](#)). Cabe mencionar que esta compactación también puede llegar a dañar la vegetación de la línea de costa y de las dunas([CONACYT, 2019](#)). Las cuestiones socioeconómicas deben incluir las prácticas de recogida y eliminación del sargazo y los usos potenciales del mismo.

En México, los esfuerzos se han centrado principalmente en la recolección de la biomasa sobre las playas, principalmente en aquellas de importancia turística, pero no se han sentado las bases para enfrentar el problema a largo plazo ([CONACYT, 2019](#)). En todo caso, los esfuerzos deben encaminarse en su recolección o desvío en el mar previo al arribazón y el inicio del proceso de descomposición en las playas, como ya fue mencionado anteriormente.

En ocasiones, el destino del sargazo recolectado termina siendo zonas de menor importancia turística, o tiraderos clandestinos; esto crea a su vez ambientes insalubres y afectaciones severas a los mantos freáticos, debido al carácter poroso del suelo de la región ([CONACYT, 2019](#)). Esta no es la manera de combatir el problema, al contrario, es pasar el problema a otro sitio, pero el problema sigue estando ahí e inclusive puede agravarse tomando este camino como “solución”.

La solución que se tome debe ser funcional tanto a corto como a largo plazo, frente a este fenómeno que resulta ser complejo y recurrente ([CONACYT, 2019](#)). Dado el elevado coste de la contención, la retirada y el transporte de los sargazos, es fundamental crear industrias que utilicen grandes volúmenes de los mismos ([Aguilera, 2016](#)).

Al recibir grandes volúmenes de sargazo en el Caribe Mexicano, el país tiene ante sí una gran oportunidad estratégica, apropiarse del sargazo como recurso biótico nacional ([CONACYT, 2019](#)). Existen distintas formas de sacarle provecho a este recurso, este podría ser utilizado para la producción de biogás, fertilizantes, ayudar a la formación de dunas con un mezcla de sargazo y arena, mejoradores de suelos (material para el compostaje), alimentos, forrajes, materiales biodegradables, entre otros.

El sargazo contiene varios componentes químicos como alginatos, fenoles nutritivos y polisacáridos, por lo que podría utilizarse en diversas industrias. Algunas maneras de aprovechar el sargazo son ([Aguilera, 2016](#)):

- Alginato de sodio para productos alimentarios, textiles y farmacéuticos.
- Bloques de construcción (40% de sargazo).
- Papel producido manualmente.
- Productos para el cuidado de la belleza.
- Producción agrícola y ganadera.
- Otros usos de la biomasa del sargazo son la producción de biogás y la bio-sorción.

El sargazo puede ser una opción más para trabajar con energías renovables, siendo éste biomasa que se utiliza para obtener bioenergía mediante la digestión anaeróbica. El

biogás suele contener entre un 50% y un 70% de metano y entre un 50% y un 30% de CO₂ y puede utilizarse como fuente de energía, directamente, transformado en biometano (>97% CH₄, <2,5% CO₂) ([Aguilera, 2016](#)). La creación de una economía circular, aprovechando los beneficios que pueden traer las grandes masas de sargazo, es la mejor manera de mitigar el daño al ambiente y a las sociedades y economías locales ([Aguilera, 2016](#)).

a) Justificación

Dada la compleja problemática socio-ambiental del arribo masivo de sargazo a las costas, la comprensión de los procesos hidrodinámicos asociados al arribo, tanto mar adentro como locales, es una herramienta indispensable para el manejo y gestión adecuados del sargazo.

En este trabajo se hace una síntesis del estado del arte y de lo que se busca desarrollar en futuras líneas de investigación.

Para ello, se presentan fechas de interés y se realizando un análisis de las mismas. Estas fechas son consideradas como “fechas importantes” para el tema en curso, ya que se reportaron arribazones por encima del promedio y/o la presencia de algún suceso atípico, como huracanes o el fenómeno de la niña o del niño.

Se analiza el clima marítimo, considerando parámetros tanto de oleaje como de viento; y finalmente se hace una modelación numérica.

Una vez realizada esta metodología, se analizan los resultados obtenidos y discuten los mismos; creando una posible relación entre parámetros hidrodinámicos y el arribo de sargazo al Caribe Mexicano.

Se finaliza el trabajo concluyendo lo que se observó del experimento de modelación y destacando las relaciones existentes entre parámetros hidrodinámicos y las arribazones.

b) Objetivos

i. Objetivo general

Analizar la relación entre los parámetros hidrodinámicos y el volumen de sargazo que arriba al Caribe Mexicano.

ii. Objetivos particulares

1. Identificar, a partir de una revisión bibliográfica, fecha de interés (máximos y mínimos) de arribazones de sargazo al Caribe Mexicano
2. A escala local y utilizando datos de reanálisis numérico, determinar para la zona de Puerto Morelos, Quintana Roo, el clima marítimo asociado a las fechas de interés.
3. Modelar numéricamente la hidrodinámica local en la zona de Puerto Morelos, Quintana Roo, asociada a las fechas de interés.

I. Marco teórico

a) Estado del arte

La dinámica del sargazo se lleva a cabo en diferentes escalas espacio-temporales y está asociada a los patrones de corrientes, oleaje y viento. Estos procesos deben ser estudiados para lograr una comprensión que permita el desarrollo de herramientas de predicción y manejo de las arribaciones. Para cuantificar la dinámica del sargazo y relacionar los eventos de deposición y eliminación de algas con las condiciones hidrometeorológicas, se necesitan conjuntos de datos de alta resolución a largo plazo.

a.1) Dinámica del sargazo en el Mar Caribe

i. Corrientes superficiales y su relación con el sargazo

([Putman et al., 2020](#)) estudió la relación del desplazamiento del sargazo en la superficie oceánica con la velocidad superficial de las corrientes, utilizando el Global-HYCOM, modelo oceánico global de coordenadas híbridas, por sus siglas en inglés, en la zona comprendida entre República Dominicana y Puerto Rico. Esto con el objetivo de mejorar las predicciones de las llegadas de esta macroalga al Caribe; además de saber en qué parte y cuándo llegará a la costa ([Putman et al., 2020](#)).

En dicho estudio se liberaron 100 partículas sintéticas en un radio de 4 km, para reflejar la resolución espacial aproximada del Global-HYCOM, en las alfombras de sargazo. Asumiendo que las partículas flotarían, se limitaron a la capa superficial del modelo; posteriormente fueron rastreadas a través de cada uno de los cinco escenarios de barlovento utilizando el software de seguimiento de partículas virtuales ICHTHYOP (Lett et al., 2008). ICHTHYOP es una herramienta de Java gratuita diseñada para estudiar los efectos de los factores físicos y biológicos en la dinámica del ictioplancton. Se evaluaron cinco posibles escenarios de viento añadiendo 0%, 0,5%, 1,0%, 3,0% y 5,0% de la velocidad del viento a la corriente superficial de HYCOM ([Putman et al., 2020](#)).

La estructura genética de las poblaciones de coral cuerno de alce (*Acropora palmata*) en el Mar Caribe sugiere que las aguas entre Puerto Rico y la República Dominicana actúan como una barrera biogeográfica para la dispersión ([Baums et al., 2006](#)). La simulación de la dispersión de larvas de coral dentro de un modelo de circulación oceánica de alta resolución (con un espacio de rejilla de ~2 km) mostró que la fuerte corriente hacia el norte a lo largo de la costa oeste de Puerto Rico limitaba en gran medida el potencial de intercambio entre las poblaciones de coral de Puerto Rico, la República Dominicana y la isla de Mona ([Baums et al., 2006](#)). Por lo tanto, el movimiento de las larvas de coral no estaría influenciado por el viento ([Putman et al., 2020](#)).

Es necesario resolver posibles sesgos sistemáticos en campos de viento y corrientes superficiales para poder aplicar estos descubrimientos a un producto operacional. Sin embargo, este seguimiento de partículas generó información importante para la mejor

comprensión del viento y las corrientes superficiales en el movimiento y desplazamiento del sargazo ([Putman et al., 2018](#); [Brooks et al., 2018, 2019](#); [Johns et al., 2020](#); [Bertola et al., 2020](#)).

Las simulaciones hechas en este estudio, y los datos de seguimiento, mostraron que las probabilidades de transporte del sargazo que se desplaza desde el océano abierto a las regiones costeras podrían calcularse a partir de los datos de las corrientes superficiales y del viento. Los pasos a seguir, para lograr un modelo de movimiento de sargazo deberían incluir ([Putman et al., 2020](#)):

- (i) Un seguimiento adicional de las alfombras de sargazo de diferentes tamaños en una gama más amplia de condiciones de viento, oleaje y corriente,
- (ii) Evaluar si los productos de circulación oceánica, viento y oleaje actuales/previstos reducen la incertidumbre para predecir las ubicaciones de varada en comparación con los datos históricos/climatológicos.
- (iii) Determinar dónde, los sesgos regionales en los datos de viento y corriente oceánica, alteran las predicciones.
- (iv) Tener en cuenta las propiedades inerciales de sargazo en las simulaciones de seguimiento de partículas.

ii. Vientos superficiales y su relación con el sargazo

El estudio de ([Woodcock, 1993](#)), muestra pruebas de que las cantidades de sargazo recogidas por las redes en la superficie del mar disminuyen con el aumento de la velocidad del viento. A partir de este nuevo hallazgo y de otras evidencias en la literatura marina, se plantea la hipótesis de que la planta está adaptada a una inmersión cíclica en las corrientes verticales inducidas por el viento de estas aguas, volviendo a la superficie sólo cuando las corrientes son menores que la velocidad de ascenso de la planta.

Por lo tanto, una inmersión periódica inducida por el viento dentro de la capa límite marina es un hecho frecuente y tal vez esencial en la vida del sargazo del Mar de los Sargazos. Las líneas de sargazo que se producen en las aguas superficiales del Atlántico Norte son el resultado de un efecto del viento, que produce "una serie de vórtices helicoidales alternados a derecha e izquierda en el agua que tienen ejes horizontales paralelos al viento" ([Langmuir, p. 119](#)), ([Woodcock, 1993](#)).

Estos movimientos inducidos por el viento en las aguas superficiales se denominan ahora comúnmente circulaciones de Langmuir (Lc's). Woodcock (1950) realizó observaciones del sargazo durante un período de varios años y demostró que la presencia de la planta debajo de la superficie bajo las líneas de convergencia de las LC's estaba siempre relacionada con la ocurrencia simultánea de vientos ≥ 4 m/s ([Woodcock, 1993](#)).

Johnson y Richardson (1977) demostraron en experimentos de cámara de presión que la profundidad a la que las plantas enteras perdían su flotabilidad positiva y se hundían parecía ser una función inversa de la tasa de cambio de presión hidrostática, lo que indica que cuanto más lento es el descenso de la planta, menor es la profundidad a la que se produce el hundimiento debido a la pérdida de flotabilidad positiva. Se trata de un

comportamiento desconcertante en una planta pelágica que seguramente desciende lentamente y que quizás se mantiene bajo la superficie durante largos periodos ([Woodcock, 1993](#)).

Según resultados del estudio ([Woodcock, 1993](#)), se sugiere que durante los vientos más fuertes aproximadamente la mitad de la población de sargazo estaba sumergida.

La constatación de que las tasas de descenso del agua bajo las líneas de convergencia aumentan con velocidad del viento ([Leibovich, 1983](#)) indica que en un lugar determinado las cantidades de sargazo que permanecen en la superficie del mar podrían estar inversamente relacionadas con la velocidad del viento si la densidad de sargazo es independiente de la profundidad ([Woodcock, 1993](#)).

No sólo habrá menos sargazo en la superficie del mar a medida que la velocidad del viento aumente, sino que la tasa media de ascenso de las plantas que permanecen allí también debería aumentar. Sin embargo, con la disminución de la velocidad del viento, debería prevalecer el proceso inverso, con cantidades crecientes de sargazo en la superficie del mar que tienen tasas medias decrecientes de ascenso ([Woodcock, 1993](#)).

La selección natural ha producido aparentemente que el sargazo tenga un rango de velocidad de subida que le permita ser arrastrado y mantenido por las corrientes descendentes bajo las líneas de convergencia, hasta que la moderación de los vientos y la consiguiente disminución de las corrientes verticales permiten que las plantas vuelvan a la superficie. El estudio teórico de Stommel sobre el papel de los vórtices de la LC en la inmersión del sargazo indica que esta actuación cíclica entre los organismos flotantes requiere valores R , la relación entre su tasa de ascenso y la tasa máxima de descenso bajo las líneas de convergencia, de las plantas entre 0.25 y 0.75 y una densidad independiente de la profundidad ([Woodcock, 1993](#)).

iii. Efecto de la fisiología del sargazo

Para reproducir con éxito la distribución estacional de la biomasa, es importante incorporar tanto la circulación oceánica como la fisiología del sargazo. El estudio de ([Brooks, Coles, Hood, & Gower, 2018](#)) sugiere que el Golfo de México y el Atlántico Tropical Occidental son regiones cuyas poblaciones de sargazo pueden influir de forma desproporcionada en la biomasa de toda la Cuenca. En este estudio se utilizaron diversos métodos de estudio para analizar el comportamiento del sargazo. Se usaron modelaciones numéricas, simulaciones y el rastreo de partículas, además de un modelo lagrangiano del crecimiento del sargazo ([Brooks et al., 2018](#)).

Analizando la hipótesis de que el sargazo es altamente flotante y está restringido a la superficie, se estudiaron características a pequeña escala impulsadas por el viento, como las células de Langmuir, que pueden ser conducidas hasta unos 100 m de profundidad, y velocidades de viento tan bajas como 4 m/s, dando lugar a sargazo subsuperficial ([Brooks et al., 2018](#)).

La estacionalidad de la tasa de coincidencia indica que otros procesos, además de la advección, están influyendo en la distribución del sargazo. La elevada coincidencia en invierno es coherente con que el sargazo experimenta temperaturas más bajas y un crecimiento suprimido que hace que el transporte físico explique en mayor medida la distribución espacial ([Brooks et al., 2018](#)).

La columna de agua subtropical está fuertemente estratificada en septiembre, lo que conduce a condiciones de bajos nutrientes y a una mezcla vertical reducida que hace más probable que sea el transporte superficial y no el crecimiento el que controle la densidad de sargazo. Los periodos de mínima tasa de coincidencia en diciembre y junio indican momentos en los que la fisiología del sargazo puede ser más importante en la fijación de su distribución ([Brooks et al., 2018](#)).

El estudio indica que el sargazo que se encuentra en Golfo de México no llega a los trópicos, ya que el convergente Giro Subtropical del Atlántico Norte es esencialmente un callejón sin salida. Esto sugiere que es necesaria una fuente meridional u oriental de sargazo para explicar la biomasa en los trópicos y el Caribe ([Brooks et al., 2018](#)).

Otro posible motor de los cambios estacionales en la biomasa de sargazo es la reproducción vegetativa. Al romperse el sargazo y las especies relacionadas, el nuevo crecimiento se inicia principalmente a partir de los fragmentos residuales ([Tsukidate 1984, Hanisak y Samuel 1987](#)).

iv. Cantidades de sargazo que arriban a las costas

Una vez que el sargazo llega a la costa, se forma una franja de sargazo. Observaciones indican que esta franja es removida bajo niveles de agua elevados y el aumento de acción de las olas, regresando a la columna de agua. Con olas altas, los arrecifes promueven corrientes que “lavan” esta macroalga de las lagunas de arrecifes ([Rutten et al., 2021](#)).

La cantidad de sargazo que llega al Caribe y al Atlántico Central tienen un aumento interanual, reportando una cobertura de 199,5 km² en 2011 con un aumento de cinco veces en 2015 (956,2 km²) ([Wang y Hu, 2016](#)).

En el Caribe y el Atlántico Ecuatorial se estimaron llegadas de sargazo de 5 millones de toneladas en 2011 y 15 millones de toneladas en 2017 ([Gower y King, 2019](#)). Sin embargo, durante 2018 se registró una de las mayores afluencias de esta alga, desde África hasta el Caribe; con una biomasa de 20 millones de toneladas que cubrió un área de 6000 km² ([Wang et al., 2019](#)), ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)).

De acuerdo a las variaciones temporales en la cobertura de sargazo, en el Caribe Mexicano, noreste de la península de Yucatán, se han observado picos altos durante diciembre de 2014 (40 km²) y verano de 2015 (60 km²) ([Cuevas et al., 2018](#)); en septiembre de 2018 (229 km²) y abril de 2019 (19 km²) ([Chávez et al., 2020](#)). De igual forma, durante 2019-2020, Cancún, México estuvo expuesto a una alta inundación de

sargazo (durante 8 semanas) principalmente en los meses de verano ([Trinanes et al., 2021](#)), ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)).

a.2) El sargazo en el Caribe Mexicano

i. Patrones de circulación en la cuenca del Caribe Mexicano

La dinámica del sargazo está asociado a los patrones de oleaje, corrientes y viento. En el caso del Mar Caribe, la circulación superficial está compuesta por un flujo hacia el oeste con velocidades de 0.5-1.0 m/s ([Kinder, 1983](#); [Schmitz y McCartney, 1993](#); [Gallegos y Czitrom, 1997](#); [Mooers y Maul, 1998](#); [Andrade y Barton, 2000](#); [Johns et al., 2002](#)). En este mar existen cardúmenes y remolinos de mesoescala, que suelen viajar de este a oeste a velocidades de aproximadamente 0.15 m/s ([Carton y Chao, 1999](#)), y algunos pueden entrar el Golfo de México a través del Canal de Yucatán. Cuando la corriente del Caribe pasa por la cuenca de las Caimán, se convierte en la corriente de las Caimán, que fluye hacia el oeste a lo largo de $19 \pm 2^\circ\text{N}$ ([Badan et al., 2005](#)), antes de girar hacia el norte a lo largo de la península de Yucatán para formar la corriente de Yucatán ([Badan et al., 2005](#); [Cetina et al., 2006](#)). La corriente de Yucatán es una corriente cálida fuerte y persistente con velocidades de hasta 2 m/s, que entra en el Golfo de México como un chorro ([Ochoa et al., 2001](#); [Sheinbaum et al., 2002](#); [Oey et al., 2004](#)). La Corriente de Yucatán se bifurca, con una parte que fluye a través del Canal de Cozumel entre México continental y la isla de Cozumel, y la otra parte que fluye al este de la isla de Cozumel. Al norte de la isla de Cozumel, la corriente se intensifica alcanzando velocidades >2 m/s en el Canal de Yucatán. Por el contrario, en la costa entre la isla de Cozumel y Bahía de la Ascensión, se observan flujos lentos e invertidos ([Carrillo, Johns, Smith, Lamkin, & Largier, 2015](#)). Los patrones de flujo a menor escala también son importantes, ya que las corrientes de marea y las interacciones flujo-topografía tienen una influencia significativa en la dispersión inicial de los huevos/larvas y vegetación flotante, inmediatamente después del desove ([Heyman et al., 2005](#); [Heyman et al., 2008](#); [Ezar et al., 2011](#); [Hamner y Largier, 2012](#)).

ii. Dinámica del sargazo en la costa del Caribe Mexicano

En cuanto a la distribución espacial del arribo del sargazo a las costas mexicanas, la zona de Puerto Morelos casi siempre ha registrado grandes agregaciones de sargazo durante los periodos de afluencia, generalmente desde marzo hasta octubre ([García-Sánchez et al., 2020](#)), ([López Miranda et al., 2021](#)). La zona entre Tulum y Puerto Morelos, incluyendo la isla de Cozumel, que recibe más sargazo, representa el 20% de la línea de costa, con una longitud de 90 km. El 80% restante del litoral estudiado recibió volúmenes menores de sargazo, pero con una alta prevalencia y baja variabilidad ([López Miranda et al., 2021](#)). Los datos con alta resolución temporal (minutos) y gran huella (km^2), que proporcionan la dirección de deriva y las velocidades del sargazo bajo un amplio rango de condiciones hidrodinámicas, pueden dar una mayor comprensión de las condiciones que gobiernan la deriva del sargazo desde el océano hasta la playa ([Rutten et al., 2021](#)).

En un estudio realizado en Puerto Morelos por ([Rutten et al., 2021](#)), en un evento en el cual hubo condiciones de oleaje de alta energía ($P > 39,7 \text{ kW/m}$) y niveles de agua extremos ($\eta > 1,42 \text{ m}$; percentil 97), se depositó la franja de sargazo al interior. Parte de la vegetación de las dunas fue eliminada o enterrada con arena durante los eventos más energéticos. Sin embargo, estos depósitos pueden tener un efecto positivo en la vegetación de las dunas ([Del Vecchio et al., 2017](#)). Por lo tanto, se observó que el sargazo se retira de la playa cuando el nivel del agua es elevado debido a las mareas o a la acción de las olas, y se deposita de nuevo cuando el nivel del agua disminuye ([Rutten et al., 2021](#)). Se supone que los vientos del noroeste alejan el sargazo de la playa orientada al NNE-SSW, lo que explica por qué no se observó ninguna llegada y varada bajo esas direcciones de viento ([Rutten et al., 2021](#)). De acuerdo a los autores, posiblemente, las olas normales de la costa (E-SE) estimulan la deriva hacia la costa, mientras que las condiciones de baja energía pueden ayudar a preservar la cohesión de las alfombras de sargazo. Por el contrario, las olas más altas y el viento más fuerte pueden romper las redes en trozos más pequeños, lo que podría explicar las condiciones energéticas más altas observadas para las llegadas más pequeñas ([Rutten et al., 2021](#)).

Asimismo, los estudios de Coronado et al. (2007) y Berriel-Bueno (2018) sugieren que la tasa de lavado del alga disminuye drásticamente con olas de menor energía. De hecho, con $H_s < 0,1 \text{ m}$, el tiempo necesario para renovar todo el volumen de agua de la laguna tiende a infinito ([Coronado et al., 2007](#)).

[Rutten et al., 2021](#) Se identificaron tres mecanismos naturales de remoción de la berma de algas, dependiendo del nivel del agua η con respecto a la elevación de la cresta de la berma z_c y la punta de la berma z_t . Para mejor comprensión de los diferentes escenarios expuestos a continuación, se presenta la Figura 4, donde se pueden observar los tres mecanismos. Para $z_t < \eta < z_c$ (Tipo I), la berma se destruye gradualmente con la formación de huecos que crecen con el tiempo, bajo una mayor acción del oleaje y un nivel de agua creciente. En el caso de $\eta > z_c$ (Tipo II), toda la berma de faja se resuspende y parte de la misma se deposita en la playa superior. El Tipo III ($\eta \gg z_c$) es similar al Tipo II, salvo que la franja se deposita en las dunas en lugar de en la parte superior de la playa, ya que las olas de alta energía ($P > 39,7 \text{ kW/m}$, $H_s > 2,9 \text{ m}$) y los niveles de agua extremos ($\eta > 1,42 \text{ m}$; percentil 97) desplazan la zona de oleaje hacia el interior. Una parte de los restos resuspendidos es expulsada del sistema cuando las olas de mayor energía activan la circulación del arrecife ([Rutten et al., 2021](#)).

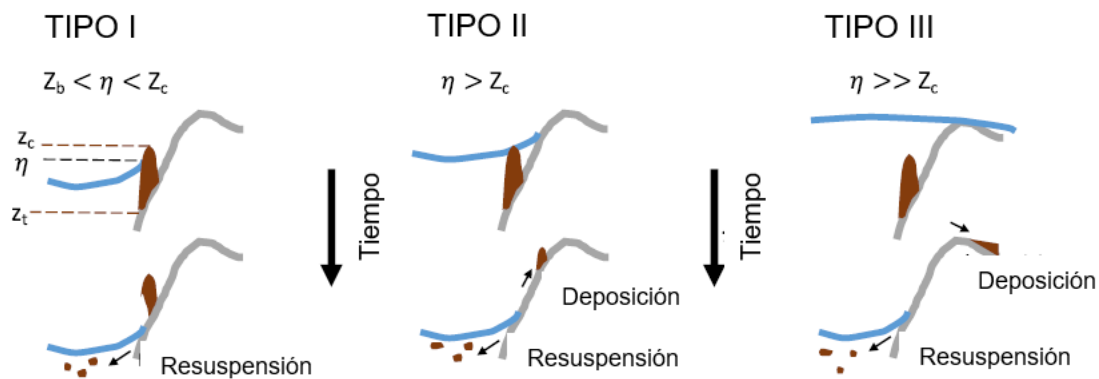


Figura 4. Mecanismos naturales de remoción de la berma de algas. Modificada de (Rutten et al., 2021)

La mayor parte del sargazo más allá de la costa es probablemente transitoria y no llega a la costa mexicana. Por lo tanto, la recolección de sargazo en mar abierto en la parte norte del Caribe mexicano puede ser indeseable; el sargazo no forma grandes concentraciones en zonas fijas, y es probable que permanezcan en el océano para ser arrastrados, hacia el norte, por la corriente de Yucatán (López Miranda et al., 2021).

Respecto a la variación temporal, las temporadas de llegada del sargazo a las costas mexicanas son entre marzo hasta principios de septiembre, teniendo el mayor pico en el mes de julio. En estos meses se han detectado esfuerzos por remover estas masas de sargazo, esto a su vez, genera que la zona de oleaje se moviera al interior, permitiendo la resuspensión de la franja de sargazo y la deposición de parte de la faja más alta en la playa a lo largo de la línea de vegetación 0.5-3 días después (Rutten et al., 2021). La afluencia de sargazo durante el verano y el invierno está influenciada principalmente por los vientos que provienen de las Antillas Menores, los cuales viajan en dirección este hasta llegar a la costa sur del Caribe Mexicano (Putman et al., 2020), (Rodríguez-Muñoz et al., 2021). Entonces, como mencionan otros autores, los vientos son la principal fuerza que induce el movimiento del sargazo debido a su flotabilidad positiva (Miron et al., 2020); (Putman et al., 2020). Es posible afirmar este método natural de retirada del sargazo, pues en eventos registrados en octubre del 2020, sólo una pequeña franja volvió a depositarse en la costa. Afirmando así que las olas de alta energía ayudan a remover el sargazo de la costa (Rutten et al., 2021).

a.3) Herramientas de análisis y visualización de datos

i. Análisis de patrones de sargazo con ayuda de imágenes satelitales

En la actualidad se emplea el uso de imágenes satelitales para analizar los patrones del sargazo, además de cuantificar la cobertura y la biomasa que llegan al Caribe, Atlántico Central, Golfo de México y Caribe mexicano (Wang y Hu, 2016; Cuevas et al., 2018; Gower y King, 2019; Wang et al., 2019; Chávez et al., 2020; Trinanes et al., 2021); con

la implementación de algoritmos de detección de las macroalgas con una amplia gama de sensores. Se han utilizado desde los algoritmos más sencillos como el Índice de Clorofila Máxima o MCI ([Gower et al., 2006 y 2013](#)), el modis Red Edge o mre ([Gower et al., 2013](#)) y el Índice de Algas Flotantes o fai ([Hu, 2009](#)), hasta los más complejos esquemas como el afai ([Wang y Hu, 2016](#)) y el erisNet ([Arellano-Verdejo et al., 2019](#)).

Detectar el sargazo mediante el uso de imágenes satelitales ha sido posible desde hace más de una década, con la implementación de algoritmos de detección de algas pelágicas con una amplia gama de sensores. Se han utilizado desde los algoritmos más sencillos como el Índice de Clorofila Máxima o MCI ([Gower et al., 2006 y 2013](#)), el modis Red Edge o mre ([Gower et al., 2013](#)) y el Índice de Algas Flotantes o fai ([Hu, 2009](#)), hasta los más complejos esquemas como el afai ([Wang y Hu, 2016](#)) y el erisNet ([Arellano-Verdejo et al., 2019](#)), ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Sin embargo, la teledetección suele presentar una resolución espacial y una cobertura temporal inadecuadas debido a la nubosidad y otros factores ([Hu et al., 2016](#)). La estimación de la cobertura de sargazo es un reto técnico, principalmente debido a la inadecuada resolución espacial y cobertura espacial/temporal, como se observa en las comparaciones cruzadas entre Landsat (30 m) y AVIRIS (8-15 m), entre AVIRIS y la fotografía aérea de baja altitud (30 - 40 cm), y entre Landsat y la fotografía aérea de baja altitud ([Hu et al., 2016](#)).

Las dificultades del método de clasificación para asignar los píxeles de la clase sargazo cuando hay mezclas (un píxel que contiene sargazo y agua) conducen a errores de omisión ([Hu et al., 2015](#); [Huovinen et al., 2018](#)), ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)). Para reducirlo, es aconsejable realizar una verificación in situ, lo cual es complejo porque, (i) el sargazo se mueve continuamente, (ii) el muestreo debe coincidir en fecha con las imágenes de satélite, y (iii) es difícil registrar parches de sargazo a lo largo de extensiones de decenas o cientos de kilómetros en un solo día ([Cuevas et al., 2018](#)), ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)).

Por lo tanto, aunque las imágenes satelitales podrían proporcionar distribuciones generales de grandes parches de sargazo, los datos satelitales por sí solos son insuficientes para proporcionar estimaciones precisas de la cobertura total de esta macroalga ([Hu et al., 2016](#)). Las observaciones de campo son esenciales para evaluar e interpretar los impactos ecológicos de futuras inundaciones de sargazo ([Schell, Goodwin, & Siuda, 2015](#)).

Lo que se recomienda es considerar toda la información que se obtiene por los diversos esquemas de detección, en las diversas escalas espaciales y temporales en que se proveen. con esa información se puede generar investigación acerca de los impactos puntuales del arribo y permanencia del sargazo en áreas de interés ecológico, social y económico. Una solución no podrá existir si no antes se abunda en el conocimiento de sus causas principales, sus efectos y, sobre todo, en conocer las consecuencias e impactos ambientales de cualquier tipo de manejo ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

ii. Plataformas virtuales de consulta

Desarrollada en México, existe la plataforma de SIMAR ([Cerdeira-Estrada et al., 2018-2021](#)). Esta es una plataforma que ofrece un sistema de información y análisis marino. Este sistema es un desarrollo tecnológico que integra algoritmos, incorporando e integrando conocimientos de diversas disciplinas, permitiendo así, la operación de sistemas de información de biodiversidad marina. Además, concentra la operación de sistemas de alertas tempranas, en las cuales se incluye alertas por arribazones de sargazo ([Cerdeira-Estrada et al., 2018-2021](#)), y la presencia del sargazo como tal, como se muestra en la Figura 5a.

La plataforma de SIMAR se basa en alianzas estratégicas y coordinaciones interinstitucionales, impulsando un intercambio de datos abiertos de información marino-costera ([Cerdeira-Estrada et al., 2018-2021](#)). La adquisición de datos de esta plataforma proviene de las siguientes instituciones ([Cerdeira-Estrada et al., 2018-2021](#)):

- SATMO – Sistema satelital de monitoreo oceánico
- SIDMO – Sistema *in-situ* de monitoreo oceánico
- SIMOD – Sistema de modelos climáticos océano-atmósfera
- GEOdat – Servicio de información geoespacial



Figura 5. (a) Alerta satelital de presencia de sargazo en el Golfo de México y el Mar Caribe, (b) Índice alternativo de algas flotantes diario, (c) Índice alternativo de algas flotantes diario – Chetumal, (d) Vientos Superficiales ([Cerdeira-Estrada et al., 2018-2021](#)).

Otro parámetro que puede visualizarse en la plataforma, es el índice alternativo de algas flotantes diario, o semanal. La Figura 5b muestra una captura del reporte diario, tomado el 30 de enero del 2022. Aquí podemos notar que aparentemente casi todas las áreas coloreadas tienen un tono azul marino, lo que representa una baja presencia de algas. Sin embargo, en la Figura 5c, haciendo un acercamiento a la imagen anterior, podemos apreciar índices altos en la costa de Chetumal. También puede visualizarse la dirección e intensidad de los vientos superficiales; como se muestra en la Figura 5d. Otros parámetros que pueden visualizarse y podrían ser de interés respecto a la existencia de sargazo en las zonas, es la temperatura superficial y la salinidad superficial del mar. Además de poder consultar cartas batimétricas y el posicionamiento de las boyas existentes cerca de las costas mexicanas. Cabe destacar que en esta plataforma es posible reportar las arribaciones de sargazo como organización civil, hotel o municipio; generando estadísticas de lo reportado ([Cerdeira-Estrada et al., 2018-2021](#)).

Por otra parte, la NOAA -“National oceanic and atmospheric administration” (Administración nacional oceánica y atmosférica), brinda reportes semanales de las inundaciones de sargazo a partir del año 2019. En estos reportes es posible visualizar el porcentaje de costa por nivel de riesgo. En la Figura 6, se muestra un ejemplo de reporte ([Trinanes & Goni, 2019-2022](#)), el cual corresponde a la semana del 14 al 20 de julio del 2020. Como es posible notar en la Figura 6, se registró un gran arribo de sargazo a la costa del Caribe Mexicano; mostrando tonalidades naranjas, indicando un nivel medio, e inclusive zonas rojas en algunas áreas, indicando altos niveles arribos ([Trinanes & Goni, 2019-2022](#)).

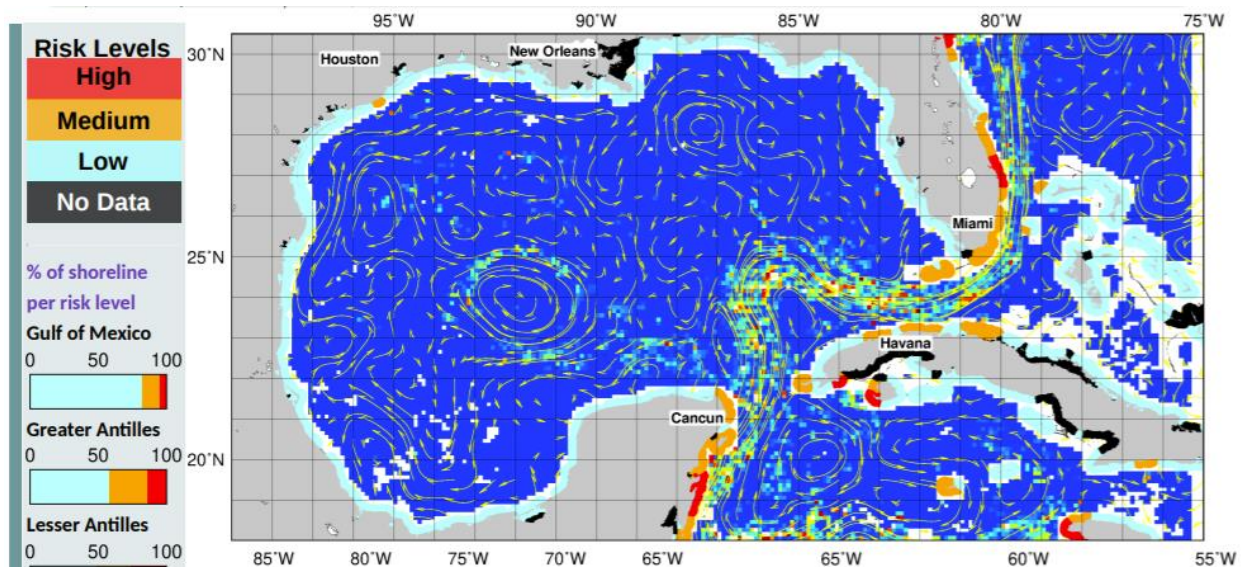


Figura 6. Reporte semanal de la inundación de sargazo ([Trinanes & Goni, 2019-2022](#)).

II. Metodología

a) Zona de estudio

Puerto Morelos es el principal puerto del estado de Quintana Roo, que conserva la esencia de un pueblo de pescadores característico del Caribe mexicano. Es uno de los destinos más emblemáticos de la región donde la tradición se combina con la naturaleza; de donde se destacan sus manglares, cenotes y una selva exuberante ([Visitmexico, 2019](#)).

Es el puerto más antiguo del estado de Quintana Roo, desde ahí se exportaban productos extraídos de la selva como el palo de tinte, el cedro, el chechén, la vainilla y el chicle, mucho antes de que existiera Cancún como ciudad. Fue siempre un tranquilo pueblo de pescadores con casas de madera, un muelle y un faro que se inclinó en el fuerte huracán del año 1967. El faro incluso es considerado un ícono del pueblo, Figura 7, ([García, Mayo, 2018](#)).

Se localiza en el litoral de la Riviera Maya; geográficamente en la costa nororiental del estado de Quintana Roo, en los 20°50'50.5" latitud norte y 86°52'30.6" longitud oeste, a 35 km al sur de Cancún y 34 km al norte de Playa del Carmen sobre la costa, como se observa en la Figura 8. Se caracteriza por la tranquilidad de sus playas. Entre las más destacadas se encuentran faro inclinado y la Ruta de los Cenotes. Su mar cuenta con un arrecife muy cerca de la costa y forma parte de la segunda barrera arrecifal más grande del mundo, siendo un destino de playa ideal para realizar numerosas actividades marinas además de vivir aventuras en la selva y formar parte del turismo ecológico ([Carabias Lillo et al., 2000](#)), ([Visitmexico, 2019](#)).



Figura 7. Puerto Morelos - Faro inclinado ([Catañeda, Septiembre, 2019](#)).

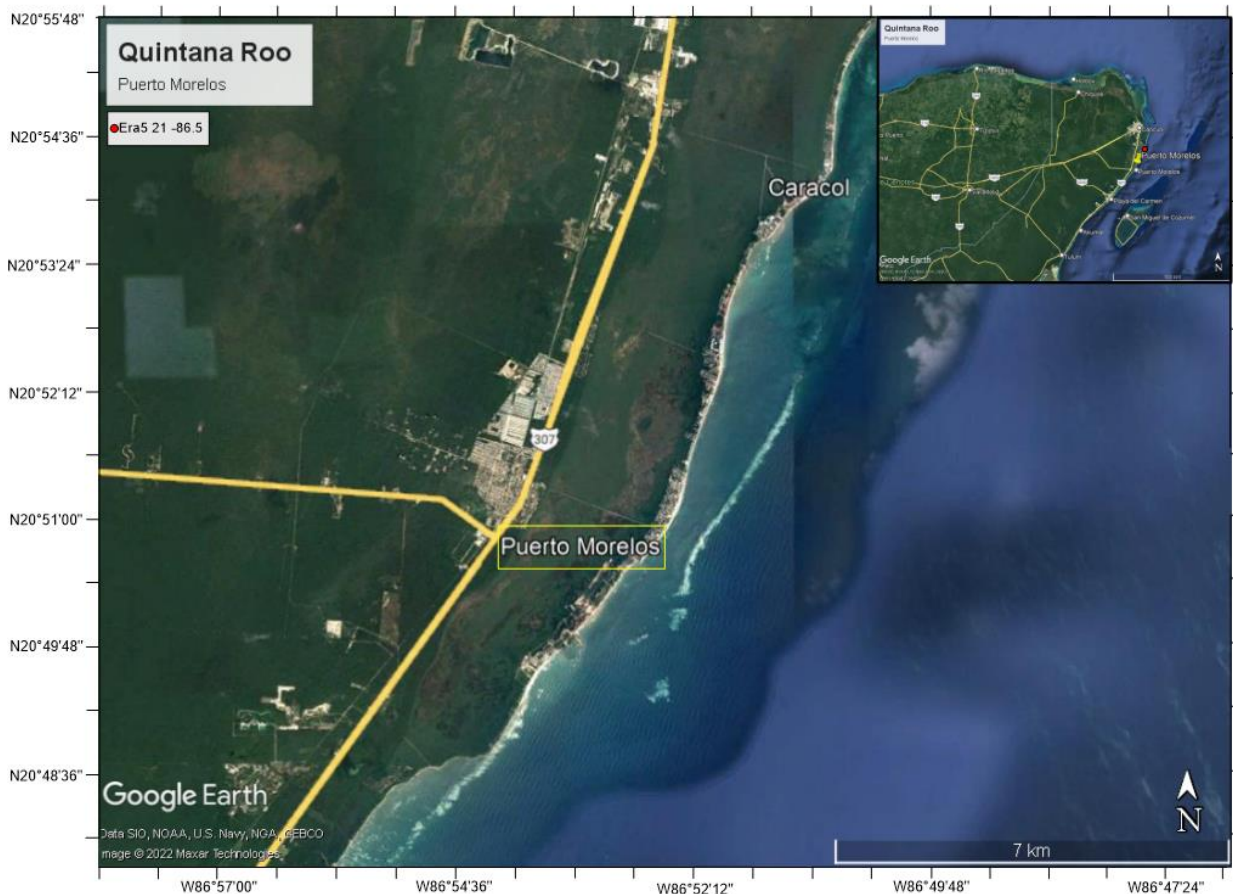


Figura 8. Caribe Mexicano - Puerto Morelos

Definitivamente una de las razones de mayor peso para la creciente importancia turística del puerto es su arrecife, declarado como Parque Nacional, forma parte del segundo arrecife más grande del mundo, el Arrecife Mesoamericano localizado a solo 500 metros de la playa ([García, Mayo, 2018](#)).

Los arrecifes coralinos constituyen el ecosistema más complejo y diverso del medio marino y se incluyen entre los ecosistemas más antiguos y productivos del planeta. En ellos habitan muchas especies de plantas y animales, algunas incluso con valor comercial, que están sujetas a diversas y variadas interrelaciones. Otras especies usan el arrecife como zona de reproducción, alimentación y crianza. Además, los arrecifes sirven como una barrera al oleaje producido por tormentas y huracanes, favoreciendo el desarrollo de playas, dunas y manglares ([Carabias Lillo et al., 2000](#)).

El arrecife constituye el recurso más importante en la economía de la comunidad de Puerto Morelos, cuya población se dedica mayoritariamente a la pesca o al turismo. El

arrecife y pastizal marino son importantes para la pesca de subsistencia, comercial y recreativa ([Carabias Lillo et al., 2000](#)).

La zona costera se caracteriza por presentar un relieve muy escaso y por la ausencia de ríos superficiales, resultado de la naturaleza kárstica del terreno. La zona costera está delimitada hacia la parte terrestre por bermas del Pleistoceno de aproximadamente 10 m de altura, y hacia el mar por una barra arenosa de 2-3 m de altura y 100-200 m de ancho que constituye la línea de costa actual (Ruíz-Rentería et al., 1998), ([Carabias Lillo et al., 2000](#)).

De acuerdo con las cartas climáticas oficiales (Secretaría de la Presidencia, 1970^a) el clima en la región es cálido, subhúmedo con temporadas de lluvia marcadas; corresponde a un clima intermedio. Merino y Otero (1991) reportan una temperatura del aire promedio anual de 26.3 °C, con un máximo en el verano de 32.5 °C y una mínima en el invierno de 13° para el periodo 1982-1983. La temperatura del aire más alta que se ha registrado fue de 34.5 °C en el verano y la mínima de 12.5 °C en el invierno (Merino y Otero, 1991), ([Carabias Lillo et al., 2000](#)).

La costa de Quintana Roo se encuentra en la trayectoria de los huracanes que se forman en el Atlántico e ingresan al Caribe. La temporada de huracanes comprende los meses de junio a noviembre, de los cuales agosto y septiembre son los meses de más alta incidencia. La determinante oceánica principal en el área es el ramal de la corriente de Yucatán, que fluye paralela al borde de la plataforma continental en dirección al Norte. Medidas del flujo hacia el norte, en el Estrecho de Yucatán, indican velocidades máximas de 4-5 nudos ([Carabias Lillo et al., 2000](#)).

La playa y el arrecife coralino son un gran atractivo turístico. La mayoría de los turistas llegan a Puerto Morelos con el único propósito de visitar el arrecife. Este tipo de turismo representa una de las pocas oportunidades que la comunidad de Puerto Morelos tiene para mejorar su calidad de vida ([Carabias Lillo et al., 2000](#)).

Según información obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), durante junio de 2021 ingresaron a México 4 millones 886 mil 357 de visitantes, de los cuales 3 millones 121 mil 312 fueron turistas internacionales. Relacionado con el tema, Puerto Morelos lugar turístico ubicado en Quintana Roo, mantuvo una ocupación hotelera estable en el verano de 2021, con un 60 por ciento de visitas en las 7 mil habitaciones del destino ([Takahashi, 2021](#)).

Es preciso mencionar, el 19 de agosto de 2021, el huracán "Grace" tocó tierra en la Península de Yucatán, con vientos sostenidos de hasta 130 km por hora. Posteriormente se dieron instrucciones de recuperar la imagen turística del área. De igual manera, se indicó levantar los escombros que dejó el ciclón y retirar el sargazo, de forma que los turistas pudieran continuar con sus vacaciones de verano de una forma adecuada ([Takahashi, Agosto, 2021](#)). A continuación, en la Figura 9, se aprecia la acumulación de sargazo en la costa en el tiempo y en la Figura 10, se muestra el sargazo existente en el mes de mayo 2021.



Figura 9. Acumulación y descomposición del sargazo en la playa de Puerto Morelos. a) Octubre 2014, b) Agosto 2015, c) Julio 2017, d) Agosto 2018, e) Octubre 2019 y f) Julio 2020. Tomada de ([Chávez et al., 2020](#)).



Figura 10. Sargazo en Puerto Morelos. a) y b) Sargazo en el mes de mayo, 2021, c) y d) pasto marino en el mes de enero 2021. Fotos tomadas por Amador Hernández Gómez, ([Rutten et al., 2021](#)).

La economía del poblado de Puerto Morelos y su área de influencia, depende de su conservación, ya que un alto porcentaje de la población se dedica a la pesca, al turismo y a la investigación sobre el ambiente marino, las cuales están estrechamente influenciadas por la salud del ecosistema ([Carabias Lillo et al., 2000](#)).

b) Hidrodinámica local asociada a las arribaciones masivas de sargazo

i. Datos de reanálisis numérico

Para el análisis del clima marítimo se utilizaron datos del Era5 ([ECMWF, 2019](#)), los cuales representan las condiciones de aguas profundas en la zona de estudio. Era5 es un modelo de reanálisis del clima global, que proporciona estimaciones horarias de un gran número de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 30 km y resuelven la atmósfera utilizando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 km ([ECMWF, 2019](#)), cubriendo los años desde 1979 hasta el presente ([ECMWF, 2019](#)).

Con el objetivo de identificar la discrepancia que existe entre los datos medidos y los datos del simulador Era5, se realizó una comparación gráfica de las siguientes variables:

- Dirección del viento (°)
- Velocidad del viento (m/s)
- Altura de ola significativa (m)
- Periodo Pico (s)
- Dirección del oleaje (°)

Dicha comparación se realizó en las coordenadas 20 N – 85 W de la malla del Era5, contra los datos de la boya 42056 de la NOAA, iniciales para “National Oceanic and Atmospheric Administration” (Oficina nacional de administración oceánica y atmosférica); cuyas coordenadas son 19°49’12’’N – 86°56’41’’W.

Se eligieron 5 años representativos para graficar las variables seleccionadas, utilizando en el eje horizontal el tiempo en fecha juliana. El criterio que se utilizó fue tomar años donde hayan ocurrido eventos extraordinarios. Derivado de esto se escogieron los siguientes años:

- 2005 – Huracanes de gran intensidad (Stan y Wilma)
- 2010 – Fenómeno la niña
- 2013 – Huracán Manuel, de intensidad significativa
- 2015 – Fenómeno el niño
- 2018 – Año “neutro”

ii. Análisis de las fechas de interés

Para analizar distintos parámetros hidrodinámicos, y su posible relación con la presencia de sargazo, se eligieron fechas (meses) reportadas en la literatura, en las cuales haya arribado una mayor cantidad de sargazo al Caribe Mexicano. Las fechas elegidas fueron obtenidas de ([Chávez et al., 2020](#)). El análisis consistió en una comparación de distintos

parámetros de clima marítimo, incluyendo rosas de vientos, y rosas de oleaje (altura de ola y periodo), además del cálculo de parámetros estadísticos, utilizando datos horarios de Era5 para las coordenadas 21N – 86.5 W. Además, se identificó la ocurrencia de eventos extraordinarios y del fenómeno del ENOS (Estatus del Niño – Oscilación del Sur) en las fechas analizadas.

iii. Modelación numérica de la hidrodinámica local asociada

De acuerdo al clima marítimo obtenido en las fechas de interés, se utilizó el software “WAPO”, con el objetivo de analizar la hidrodinámica local y su relación con las arribazones de sargazo al caribe mexicano.

Para comenzar la modelación se trazó la batimetría de la zona de estudio, Puerto Morelos. Esta fue trazada a partir de la carta náutica de la zona misma, con la utilización del software “Global Mapper”. En la Figura 11 se observa un acercamiento de la carta náutica y los puntos trazados según las profundidades indicadas.

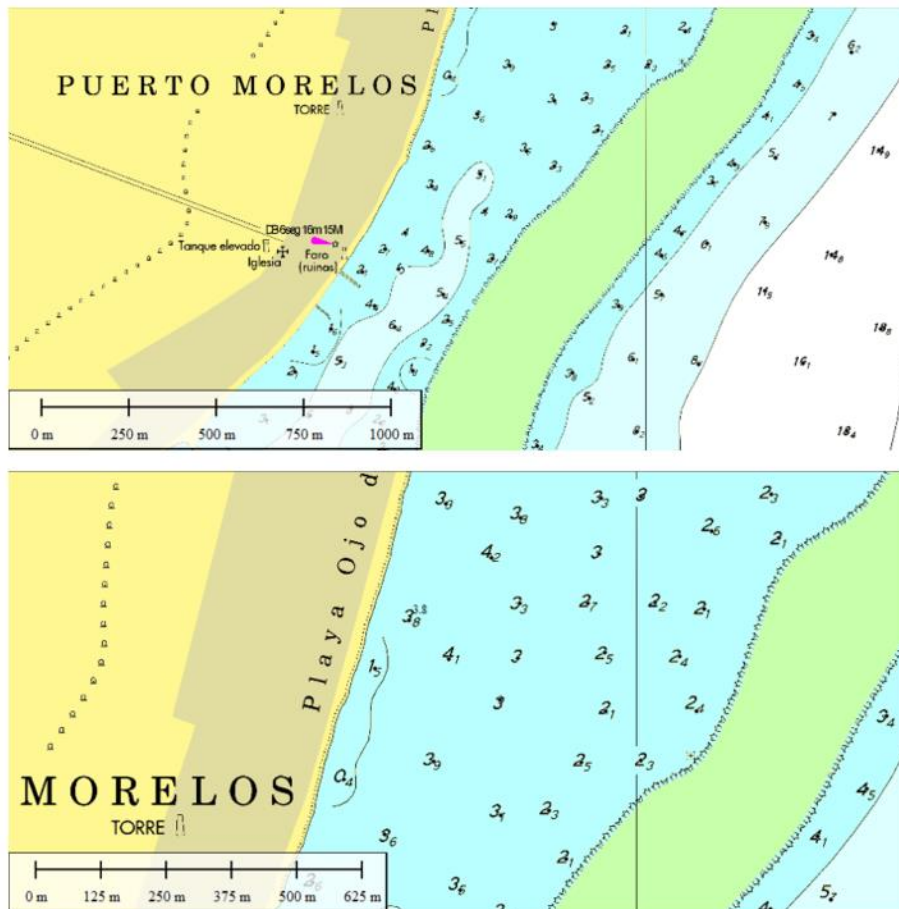


Figura 11. Trazo de batimetría, Puerto Morelos – Acercamiento

Una vez realizada la batimetría, se pudo obtener la malla con la que se trabajaría como GRD, en el software “Surfer”. Las características de esta malla se muestran en la Figura 12. Como es posible notar en Figura 12 el método de interpolación utilizado es el “Kriging”. Kriging es un método de inferencia espacial, el cual nos permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por la muestra ([Porras Velázquez](#)). En este caso, al utilizar el software “WAPO” para hacer las corridas, se puso énfasis en no tener más de 1000 celdas en el número de nodos pues es una restricción del software, que se indica en su manual respectivo; en este caso el número de nodos fue de 973 en dirección X y de 873 en dirección Y.

Así mismo, a lado del número de nodos se encuentra relacionado el espaciamiento de las celdas tanto en sentido X como Y, que en este caso fue de 7 en ambas direcciones.

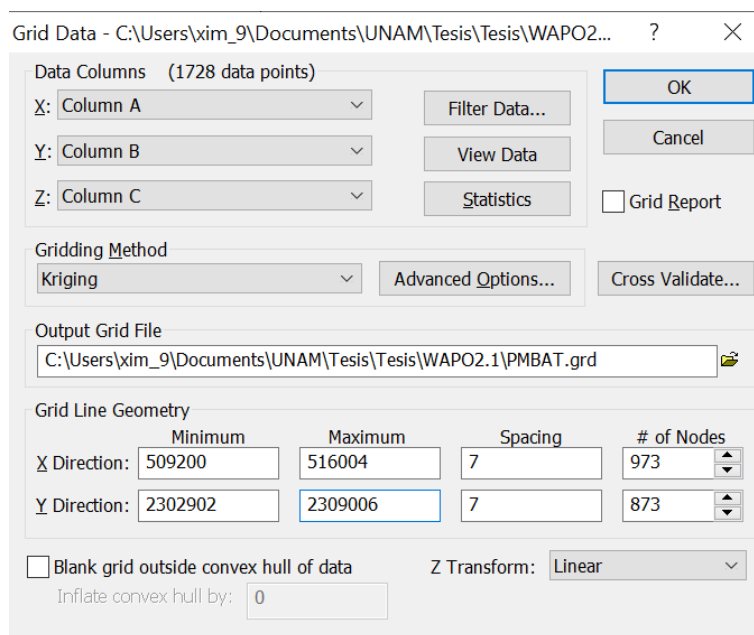


Figura 12. Características de la malla

Para las fechas de interés se obtuvo del análisis del clima marítimo las condiciones de oleaje reinantes, es decir, las que tuvieran la mayor probabilidad de ocurrencia. Estas mismas fueron introducidas como dato en el programa WAPO, así como sus demás características que en este caso se manejaron distintas alturas de ola (H en metros) y periodos de ola (T en segundos). Además, se introdujo el ángulo y dirección de incidencia del oleaje por analizar.

III. Resultados y Discusión

a) Datos de reanálisis numérico

Las gráficas de todos los parámetros mencionados, y de cada uno de los 5 años tomados en consideración, se encuentran en el Anexo 2 Sin embargo, a continuación, se muestran algunas gráficas representativas:

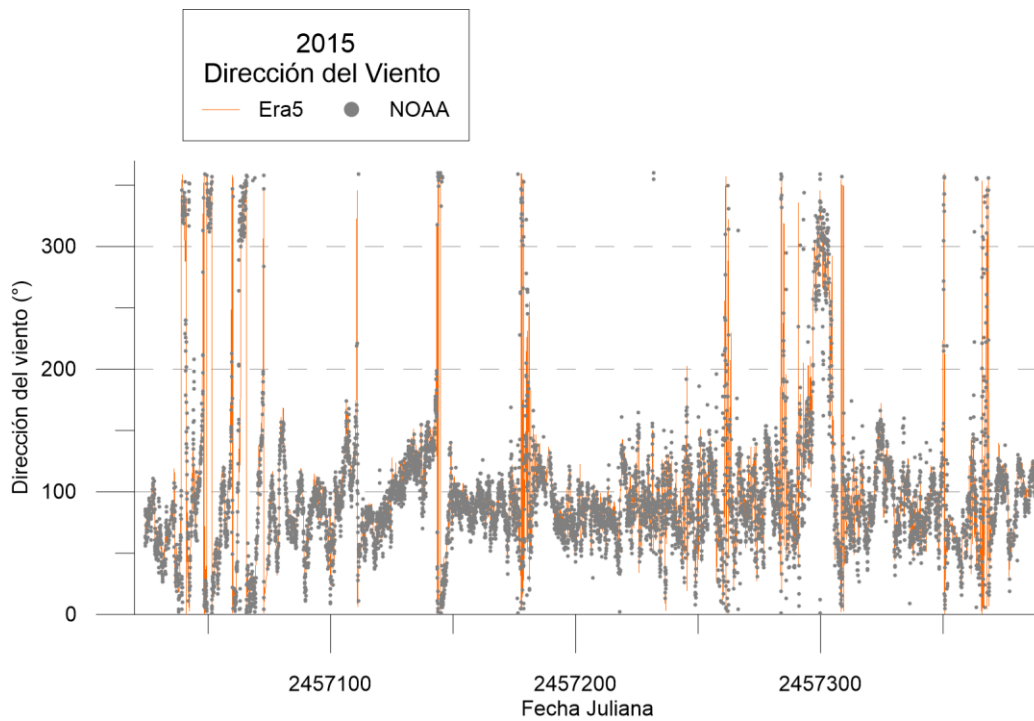


Figura 13. Dirección del viento - 2015

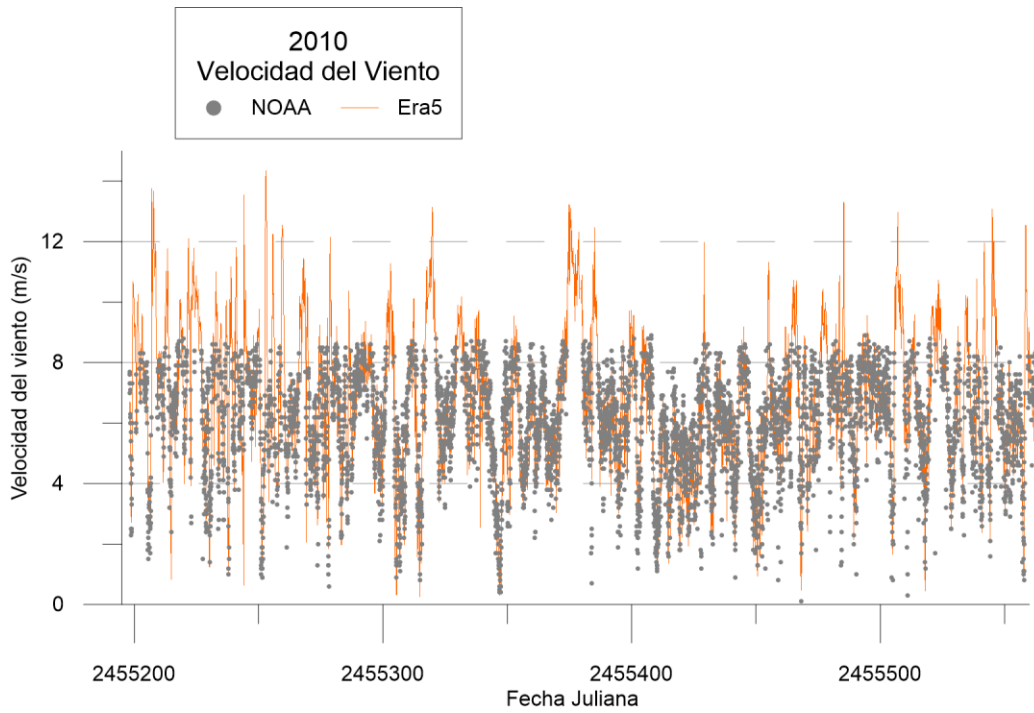


Figura 14. Velocidad del viento – 2010

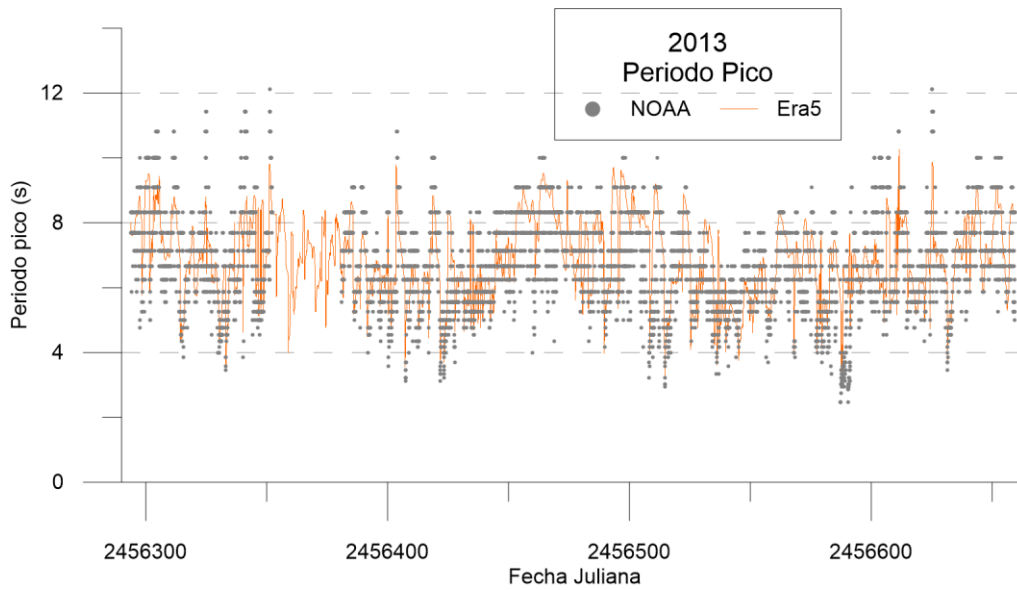


Figura 15. Periodo pico - 2013

Es preciso decir que el error es mínimo pues existe una gran concordancia con los datos de ambas fuentes, como se puede apreciar en la gráfica 1, los datos arrojados por la Era5 siguen en patrón los datos leídos por la NOAA. Sin embargo, existen algunas variantes, como se puede observar en la gráfica 2, donde aparentemente existe un “tope” de los datos leídos por la NOAA, esto se puede deber ya sea a un error de lectura o de recolección de los datos en la base.

Por último, en la gráfica 3, es posible notar un “hueco” en donde parece ser que la NOAA no reportó lectura para completar ese espacio de tiempo, parece ser un error recurrente justo en el año 2013 pues en las demás gráficas de este año, de otros parámetros, es posible notar este mismo espacio donde se corta la gráfica de la NOAA (los puntos grises). Se espera que, a pesar de no contar con estos datos, coincida su comportamiento con los propuestos por el Era5, puesto que el resto de la gráfica muestra datos similares, dibujando el mismo patrón en la gráfica.

b) Identificación de fechas de interés

Las fechas consideradas de interés en este trabajo, se centran en los años del 2017 al 2020: abril del 2017; septiembre y diciembre del 2018; y enero y abril del 2019; además de un análisis de julio del 2020. Estas fechas representan los picos máximos de cobertura de sargazo detectado en las costas, en la **Error! Reference source not found.** se muestra un resumen de las fechas con su cobertura de sargazo respectiva. Se observa que el pico de 2017 es mucho menor que lo reportado en los demás años, lo cual coincide con el patrón registrado por ([García-Sánchez et al.](#)) en su análisis de biomasa encontrada en un segmento de la playa de Puerto Morelos ([Chávez et al., 2020](#)).

| Fecha | Área de cobertura del sargazo (m ²) |
|------------------------|---|
| 21 de abril, 2017 | 2,063.00 |
| 15 de septiembre, 2018 | 22,932.00 |
| 04 de diciembre, 2018 | 15,743.00 |
| 05 de enero, 2019 | 13,077.00 |
| 11 de abril, 2019 | 19,170.00 |
| 18 de julio, 2020 | 12,799.00 |

Tabla 1. Cobertura de sargazo - fechas

c) Clima marítimo de las fechas de interés

Con el fin realizar un análisis de distintos patrones hidráulicos para fechas de interés, a lo largo de 4 años, del 2017 al 2020, se graficaron rosas de los vientos comparando distintos parámetros.

A continuación, se muestran las gráficas divididas en incisos los cuales representan:

- a) Rosa de los vientos (dirección del viento contra velocidad del viento)

- b) Rosa de altura de ola significativa (dirección del oleaje contra altura significativa de ola)
- c) Rosa de periodo pico de ola (dirección del oleaje contra periodo pico)

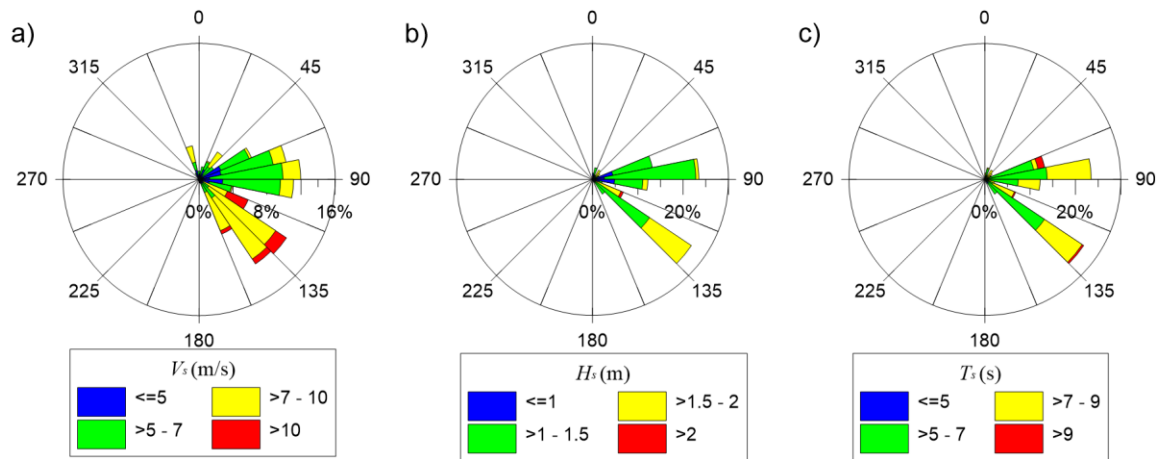


Figura 16. Abril 2017. Datos obtenidos del reanálisis climático Era5

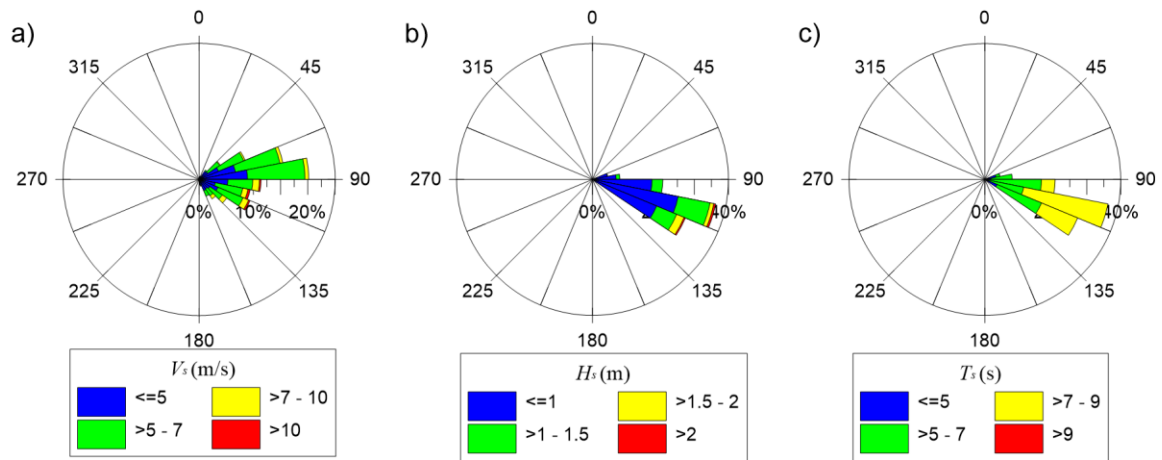


Figura 17. Septiembre 2018

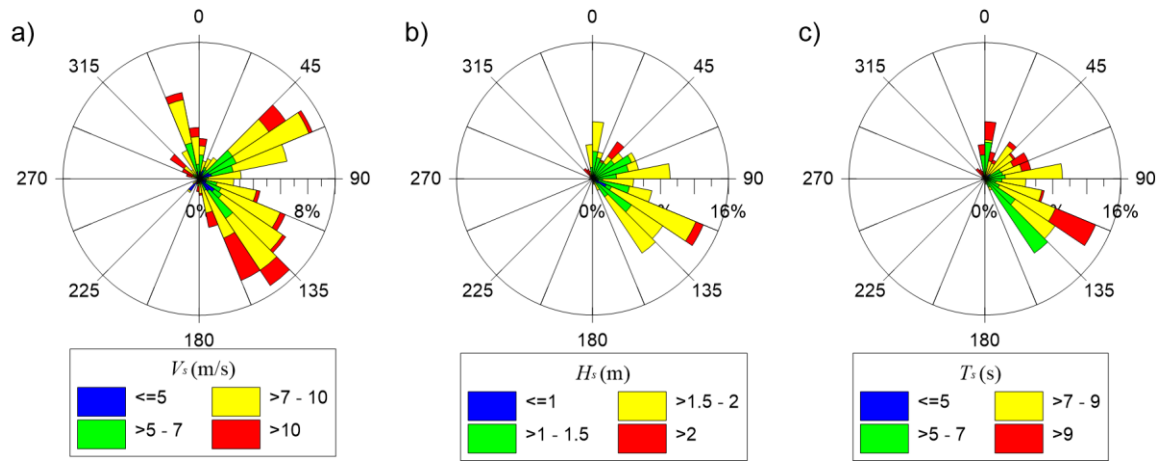


Figura 18. Diciembre 2018

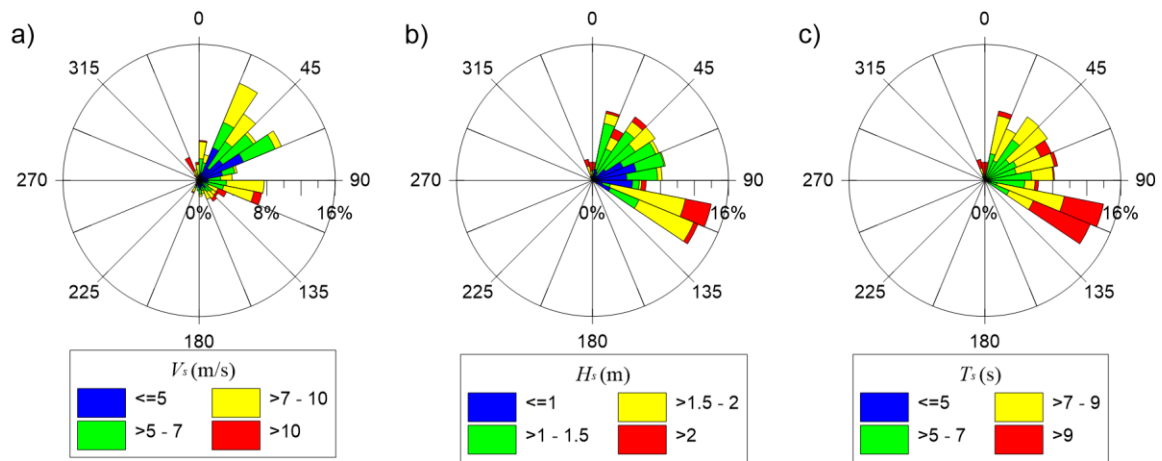


Figura 19. Enero 2019

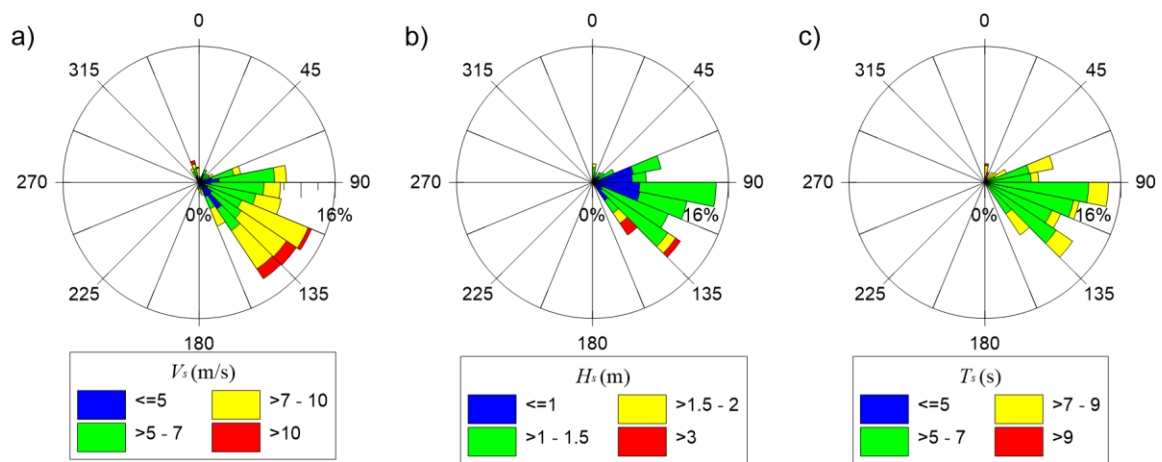


Figura 20. Abril 2019

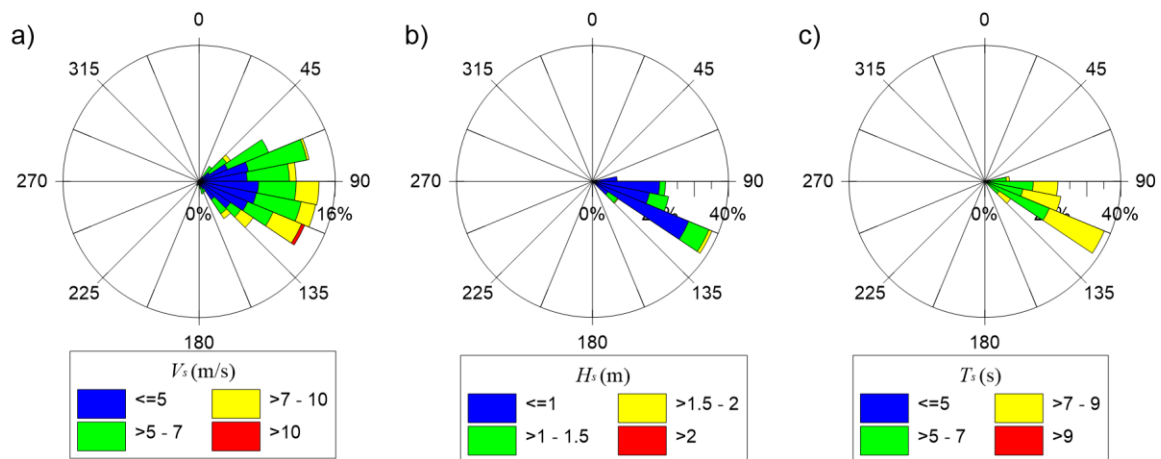


Figura 21. Julio 2020

Como es posible apreciar, la intensidad varía según el parámetro analizado. En la Figura 18, notamos más valores que superan los 10 m/s en la rosa de los vientos respecto a las demás fechas; volviendo a la **Error! Reference source not found.**, es posible notar que el rango de cobertura para diciembre del 2018 está en el tercer lugar de mayor cobertura, dentro de las fechas analizadas. En este caso se podrían considerar las altas velocidades del viento como factor que influyó a las grandes arribazones. Continuando con las altas velocidades de los vientos, es posible notar en la Figura 20, que toma el segundo lugar en las fechas con mayor cobertura, que en efecto los vientos son de velocidades mayores que el resto, teniendo velocidades entre los 7–10 m/s. Sin embargo, la Figura 17 mete en duda la generalización de los fuertes vientos como factor puesto que, a pesar de no tener vientos de grandes velocidades, esta fecha cuenta con la mayor cobertura de sargazo.

Por otro lado, en cuanto a la rosa de altura de ola significativa, las olas de mayor altura se presentaron en enero del 2019 como se puede ver en la Figura 19. Por último, en los valores periodo pico de ola, se aprecian los mayores valores tanto en diciembre del 2018, Figura 18, como en enero del 2019, Figura 19, lo que hace sentido por ser meses consecutivos, es decir, las condiciones se mantuvieron por dos meses.

En cuanto a las condiciones de viento, la escala permite observar que en promedio se encuentran entre los 5 y los 10 m/s, existiendo casos donde se superan los 10 m/s. Referente a la altura de ola significativa, es posible notar que tan solo algunas veces se exceden los 2 m de altura, pero la mayor parte del tiempo los 2 m se toman como valor máximo. Finalmente, el periodo pico de ola ronda entre los 5 y 9 s, excediendo en algunos meses (años) los 9 s.

i. Parámetros estadísticos

Para observar la tendencia del comportamiento de los parámetros hidrodinámicos, se realizaron gráficas de probabilidad conjunta, comparando tanto la altura de ola en metros contra la dirección del oleaje en grados, como la altura de ola contra el periodo en segundos, para las fechas de interés.

A continuación, en la Figura 22 se pueden observar las gráficas de probabilidad conjunta para altura de ola vs. Dirección del oleaje; y en la Figura 23 se muestran las gráficas correspondientes a altura de ola contra periodo.

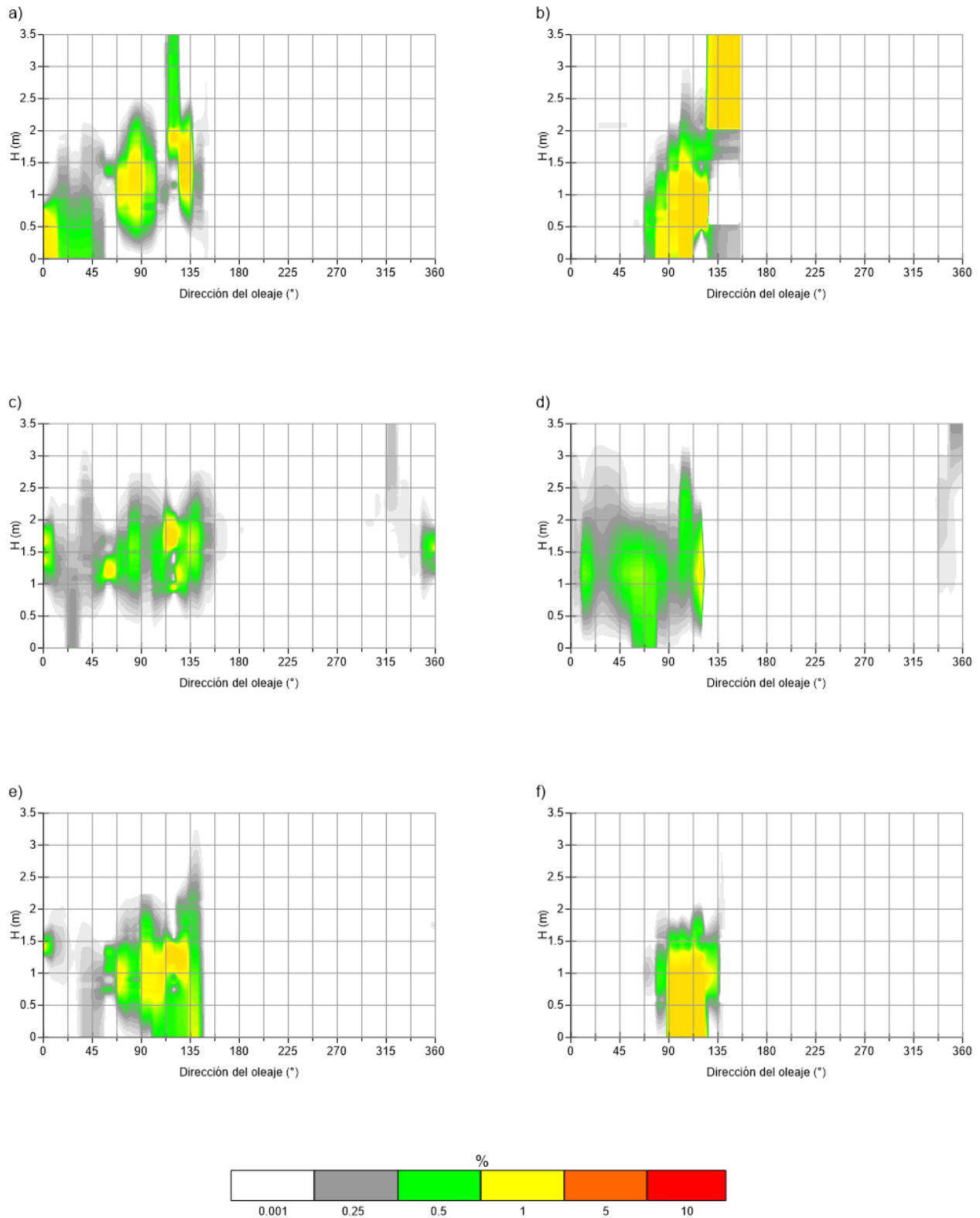


Figura 22. Gráficas de probabilidad conjunta de dirección del oleaje (°) contra altura de ola (m). a) Abril 2017, b) septiembre 2018, c) diciembre 2018, d) enero 2019, e) abril 2019 y f) julio 2020.

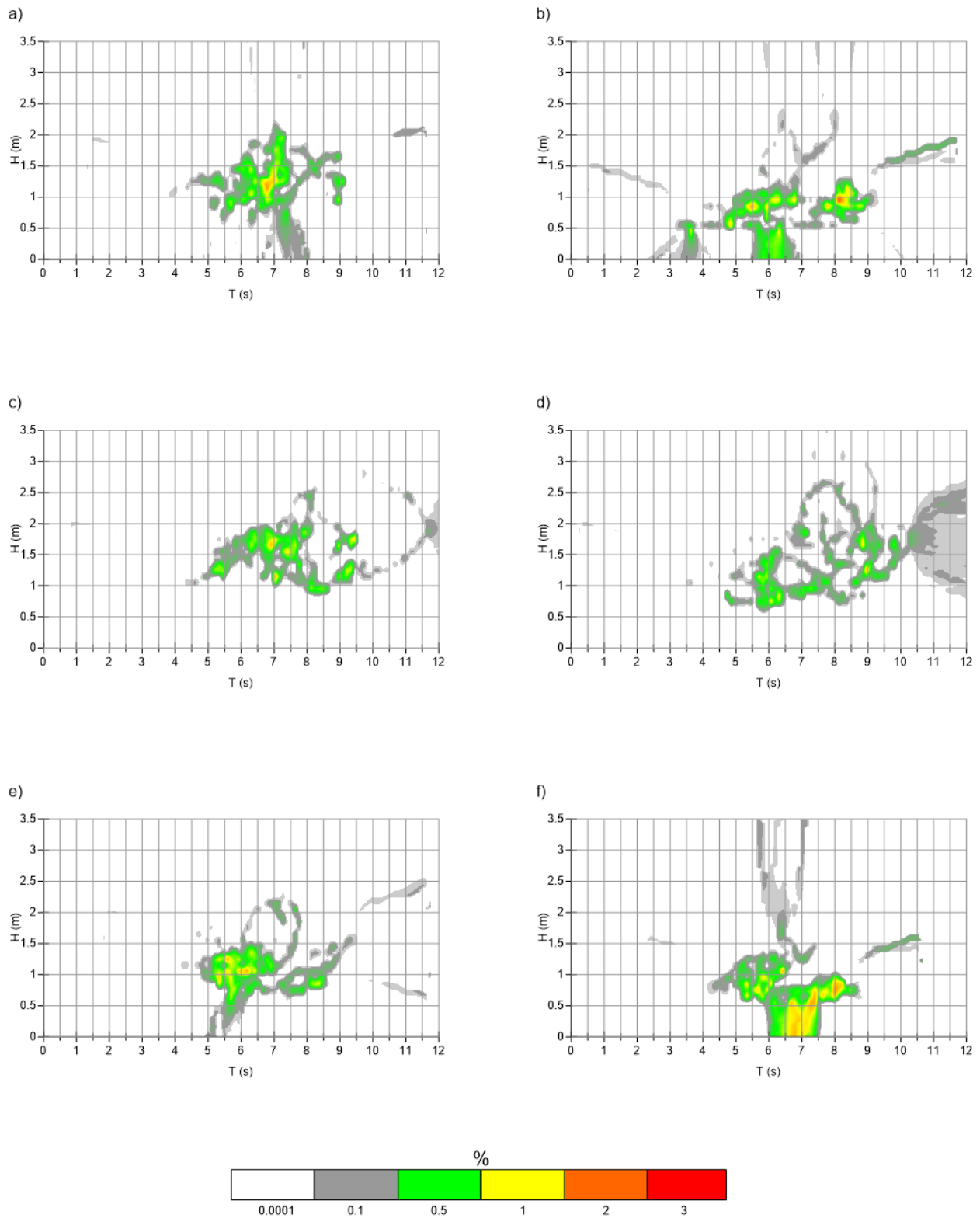


Figura 23. Gráficas de probabilidad conjunta de periodo (s) contra altura de ola (m). a) abril 2017, b) septiembre 2018, c) diciembre 2018, d) enero 2019, e) abril 2019 y f) julio 2020.

En las gráficas de la Figura 22, es posible notar que la mayor probabilidad de ocurrencia, mayores porcentajes, se dan en grados correspondientes a 67.5° y hasta los 135° aproximadamente. Por otro lado, los datos con mayor probabilidad de ocurrencia en la Figura 23, comprenden periodos de 5 a 8.5 segundos aproximadamente.

En la Figura 22 el panel b), que representa la fecha analizada de mayor cobertura de sargazo, muestra los porcentajes más altos de ocurrencia, con una dirección del oleaje en mayor medida entre los $90-135^\circ$, respecto a una altura de ola significativamente alta, respecto a los demás paneles; alcanzando alturas de hasta 3.5m.

Los paneles c) y d) muestran un ligero cambio de dirección, incluyendo en este caso los 45° , además, es posible observar que las probabilidades de ocurrencia se mantienen similares. Esto hace sentido por tratarse de meses continuos.

En la Figura 23 es interesante notar cómo el panel b), a pesar de representar la fecha con mayor cobertura, su relación de periodo contra altura de ola, muestra las alturas de ola más bajas con respecto al resto de los paneles,

En ambas figuras es posible ver que la altura máxima de ola no suele pasar los 2 metros, con algunas excepciones, debidas probablemente a condiciones meteorológicas extremas o anormales. En este caso alguna tormenta tropical, ya que como se mencionó anteriormente, no se detectaron eventos extraordinarios en ninguna de las fechas analizadas.

En cuanto a los eventos extremos, se identificó que no se presentaron eventos extraordinarios sino algunas tormentas tropicales, propias de los meses lluviosos. Respecto al ENOS (Estatus de Niño – Oscilación del Sur) las fechas analizadas muestran un estatus “neutro”, implicando que no existieron fenómenos ni de la niña ni del niño, es decir, no hubo fluctuaciones notables en la temperatura oceánica.

a) Modelación numérica de la hidrodinámica local asociada en las fechas de interés

La batimetría de la zona de estudio se obtuvo mediante la carta náutica de Puerto Morelos, en la Figura 24 se aprecia el resultado final del trazado de todos los puntos en lo que es la zona de estudio.

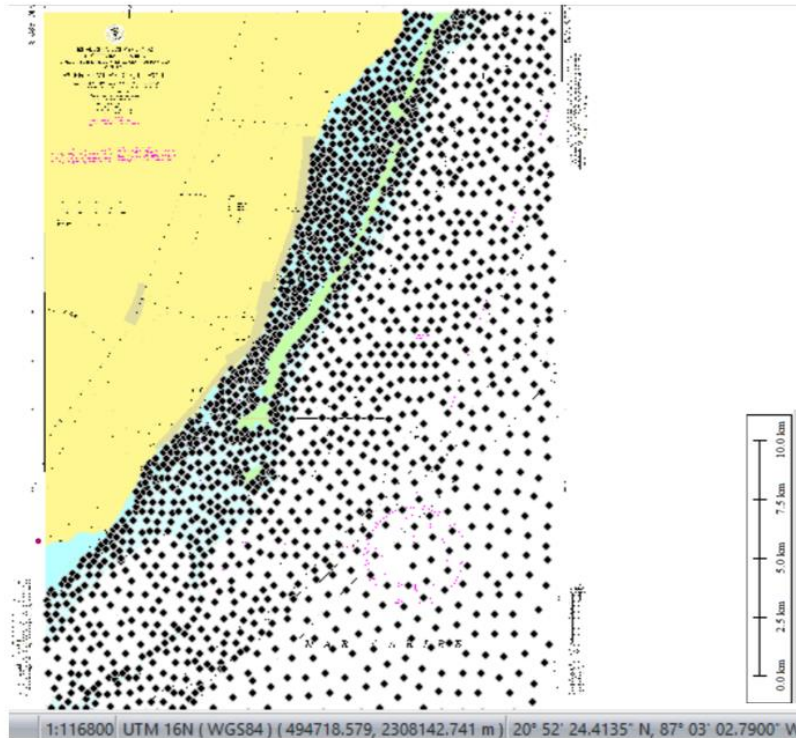


Figura 24. Trazo de batimetría - Puerto Morelos

Es preciso mencionar que esta batimetría fue generada con datos de una escala gruesa, al ser obtenidos solamente de la carta náutica de la zona. Esto pudo haber sido mejorado con la adición de datos de campo, para mejorar la calidad de la información obtenida.

En la Figura 25 se observa el GRD o malla base que se utilizó para las corridas, es decir, el GRD del cual partió el modelo; con sus respectivas profundidades que ilustran los diferentes colores en la figura.

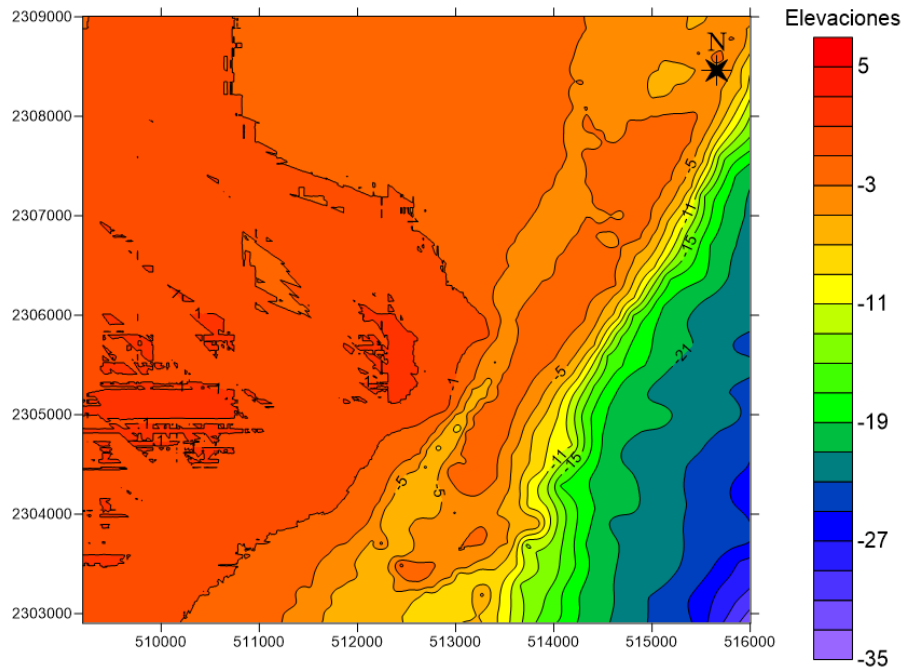


Figura 25. GRD con elevaciones de la zona de estudio

Los casos seleccionados que se introdujeron al modelo fueron los siguientes:

| Fecha | Periodo T(s) | Altura de ola H(m) | Dirección de ola (°) |
|------------------------|--------------|--------------------|----------------------|
| 21 de abril, 2017 | 6.9 | 1.2 | 0 |
| 15 de septiembre, 2018 | 8.2 | 1 | -45 |
| 04 de diciembre, 2018 | 7.1 | 1.2 | -45 |
| 05 de enero, 2019 | 9 | 1.3 | 45 |
| 11 de abril, 2019 | 6.2 | 1.1 | -45 |
| 18 de julio, 2020 | 8.1 | 0.8 | -45 |

Tabla 2. Casos seleccionados para el modelo

En la figura 26 se muestran los resultados obtenidos en un mapa de contorno, en la zona de estudio.

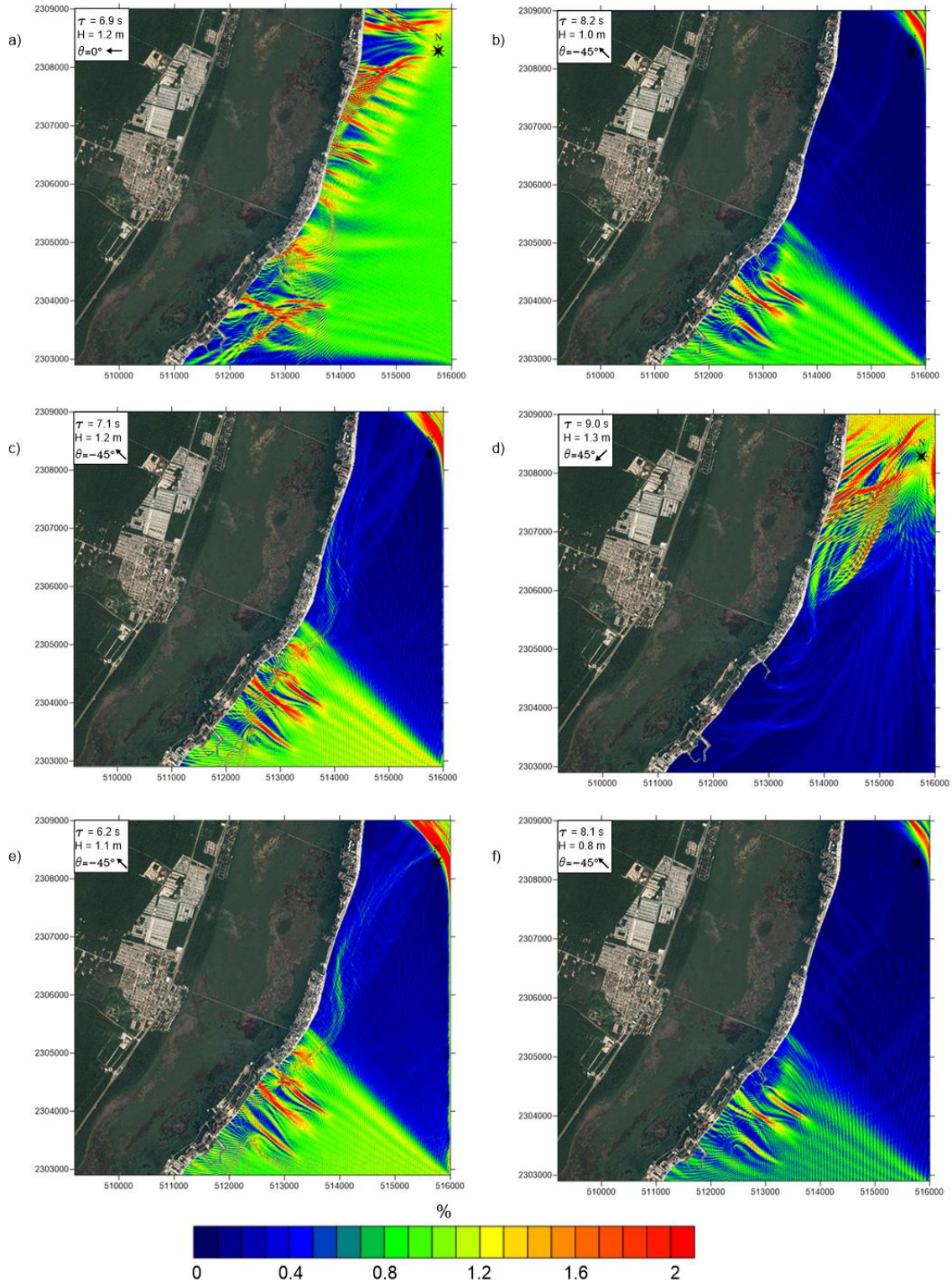


Figura 26. Gráficas de contorno obtenidas de las corridas del software "WAPO". a) Abril 2017, b) septiembre 2018, c) diciembre 2018, d) enero 2019, e) abril 2019 y f) julio 2020.

En la figura 26 es posible notar el patrón que toman las corrientes. Para el mes de abril del año 2017, panel a), se observa una intensidad de oleaje en toda la superficie marina de la zona, moviéndose estas corrientes básicamente de derecha a izquierda. Cabe notar que los registros obtenidos de esta fecha son menos en cuanto a cantidad, respecto a los años siguientes. A pesar de parecer un sesgo, la comparación no es totalmente coherente por el simple hecho de tener un promedio de menos datos. Sin embargo, es posible hacer una generalización en cuatro de las seis fechas de interés, pues los paneles b), c), e) y f) muestran la misma tendencia, con corrientes provenientes del sureste hacia lo que es la línea de costa.

Es posible ver un patrón puesto que los paneles del b)-f), con excepción del panel d), presentan oleaje proveniente de la misma dirección, sureste hacia la costa, es decir, con un ángulo de -45° según la conversión del WAPO, lo cual habla de un ángulo de 315° en una rosa de los vientos. Las fechas de los paneles mencionados, coinciden con las mayores coberturas de sargazo, dentro de las fechas de interés analizadas. Se pueden visualizar las cifras en la **Error! Reference source not found.**.. Inclusive, en último panel, en el año 2020, a pesar de los vientos tener las mismas características en cuanto a ángulo de procedencia, notamos una baja en su porcentaje, al no mostrarse la gráfica con tonalidades verdes tan marcadas como en los demás paneles. Esto coincide con las cifras puesto que, a pesar de notar una cantidad importante de sargazo en la costa, la cantidad disminuyó.

Esto podría permitir la generalización relativa de estas condiciones para las arribazones de sargazo. Relativa puesto que existe la excepción del panel d) en donde el oleaje toma otra dirección. Este cambio de dirección en el oleaje posiblemente lavó el sargazo que se encontraba en la costa el mes anterior; razón por la cual se nota la disminución en la cobertura reportada para este mes. Entonces, el patrón que persiste en las mayores apariciones de sargazo en la costa, es el oleaje con dirección sureste a la línea de costa.

Las arribazones masivas de sargazo, son dependientes de tres características hidrodinámicas que son las corrientes marinas, el viento y el oleaje. En el software WAPO los datos a considerar integran características del oleaje, sin embargo, no se incluyó el viento en el modelo.

IV. Conclusiones y futuras líneas de investigación

En un marco general, el sargazo es un conjunto de algas marinas que han arribado de forma masiva a las playas del Caribe, incluyendo a las de México. Esta alga forma parte del hábitat para diversas especies marinas; desde servir como refugio para tortugas, hasta fungir como proveedor de alimento y nutrientes para los ecosistemas costeros; siendo benéfico para la biodiversidad marina.

Sin embargo, la problemática comienza cuando la reproducción del sargazo se sale de los límites deseados. Este aumento se debe en gran medida al cambio climático y a acciones antropogénicas que alteran el ambiente. A su vez, las balsas de sargazo se convierten en un ecosistema altamente susceptible a la contaminación marina, fomentando el cambio climático ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)), generando un ciclo.

En el mar, se enfatizan problemáticas como modificación en la calidad del agua cerca de la línea de costas, y una posible eutrofización total o parcia. Al llegar esta macro alga a la costa, se descompone tras un par de días, generando lixiviados y materia orgánica que llegan al mar por la acción de las olas, creando mareas marrones, que pueden afectar a la flora y la fauna cercanas a la costa, directamente, y al arrecife de coral, indirectamente.

Es preciso tener en cuenta que el sargazo no sigue un patrón marcado para su arribo, es intermitente y su llegada se asocia a los meses de mayo a septiembre, según datos de años posteriores ([CONACYT, 2019](#)), teniendo el mayor pico en el mes de julio.

Este trabajo permitió el análisis de los patrones en la hidrodinámica local inducidos por el oleaje, y la relación que estos tienen con las arribaciones de sargazo al Caribe Mexicano. Se identificaron fechas de interés en las cuales haya arribado una mayor cantidad de sargazo a la zona de estudio, que en este caso es Puerto Morelos. Las fechas elegidas, fueron obtenidas de ([Chávez et al., 2020](#)).

Gracias al reanálisis numérico se determinó el clima marítimo, observando la asertividad que otorga el simulador Era5, respecto a las lecturas registradas en el NOAA. Además de esto se pudieron apreciar los picos, tanto máximos como mínimos, existentes en las fechas de interés, que muestran comportamientos extraordinarios.

Finalmente, gracias a la utilización del software “WAPO” fue posible hacer una modelación numérica para las distintas fechas analizadas. En las fechas de mayor existencia de sargazo, equivalente a los años 2018-2020 de las fechas seleccionadas (con excepción de enero del 2019), se muestran condiciones de oleaje provenientes del sureste hacia la línea de costa. La línea de costa muestra las mayores coberturas con este patrón, indicando una conexión con la corriente de Yucatán, entrando a la zona de estudio y finalmente encallando en la costa de la misma. La excepción mencionada anteriormente, enero del 2019, es una fecha interesante pues al cambiar de dirección el oleaje, proveniente del noreste, se asume que este cambio de dirección generó un lavado

de sargazo en la costa. A l haber grandes cantidades un mes anterior, la gran cobertura persistió en la costa, sin embargo, las cifras disminuyen, pudiendo confirmar esta asunción.

Dado que la dinámica del sargazo se lleva a cabo en diferentes escalas espacio-temporales y está asociada a los patrones de corrientes, oleaje y viento, como futuras líneas de investigación se tendría el estudiar estos procesos y sus relaciones para tener una descripción más robusta del fenómeno. De esta forma, se obtendrá una mejor comprensión para el desarrollo de herramientas formales de predicción y manejo de las arribazones de sargazo. Además, es indispensable contar con la validación de los modelos numéricos utilizando datos medidos en sitio.

Referencias

- (SEMARNAT), S. d. M. A. y. R. N. (2021). Lineamientos Técnicos y de Gestión para la Atención de la Contingencia Ocasionada por Sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México. *Gobierno de México, Medio Ambiente* 50.
- Aguilera, E. A. R. (2016). Producción de biogas a partir de Biomasa. *Adaptación al Cambio Climático*, 17, 11-22.
- Berinstain, B. T. (enero-abril 2019). El Sagazo en las costas mexicanas *La Ciencia y el Hombre*, XXXII.
- Brooks, M. T., Coles, V. J., Hood, R. R., & Gower, J. F. R. (2018). Factors controlling the seasonal distribution of pelagic Sargassum. *Marine Ecology Progress Series*, 599, 1-18.
- Calzada, A., & Marín-Antuña, J. (2004). Los accidentes por derrames de hidrocarburos en el mar. Historia de la modelación matemática de sus procesos físicos. 11, 54-62.
- Carabias Lillo, J., Provencio, E., de la Maza Elvira, J., Gutiérrez Carbonell, D., & Gómez Cruz, M. (2000). PROGRAMA DE MANEJO DEL PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS. SEMARNAP.
- Carrillo, L., Johns, E. M., Smith, R. H., Lamkin, J. T., & Largier, J. L. (2015). Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Continental Shelf Research*, 109, 164-176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.014>
- Catañeda, A. (Septiembre, 2019). Qué hacer en Puerto Morelos y su alrededores.
- Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdéz-Chavarin, J., Rosique-de la Cruz, L., Perera-Valderrama, S., López-Perea, J., . . . Ressler, R. (2018-2021). Sistema de Información y Análisis Marino-Costero (SIMAR). CONABIO.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Francisco, V., . . . Silva, R. (2020). Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12(10). doi:10.3390/w12102908
- CONACYT. (2019). Arribazón de sargazo a las costas mexicanas.
- contributors, E. (24 enero 2022 00:58 UTC). Sargassum natans. *EcuRed*.
- ECMWF. (2019). Copernicus Europe's eyes on Earth - Era5. *Climate Change Service*.
- García-Sánchez, M., Graham, C., Vera, E., Escalante-Mancera, E., Álvarez-Filip, L., & van Tussenbroek, B. I. Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean., 167.
- García, E. (Mayo, 2018). ¿QUÉ HACE A PUERTO MORELOS TAN ESPECIAL? *Club Solaris*.
- Hu, C., Hardy, R., Ruder, E., Geggel, A., Feng, L., Powers, S., . . . McDonald, T. (2016). Sargassum coverage in the northeastern Gulf of Mexico during 2010 from Landsat and airborne observations: Implications for the Deepwater Horizon oil spill impact assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 107(1), 15-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.045>

- López Miranda, J. L., Celis, L. B., Estévez, M., Chávez, V., van Tussenbroek, B. I., Uribe-Martínez, A., . . . Silva, R. (2021). Commercial Potential of Pelagic Sargassum spp. in Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 8. doi:10.3389/fmars.2021.768470
- Porrás Velázquez, A. M. e. G. Método Kriging de inferencia espacial. 7.
- Putman, N. F., Lumpkin, R., Olascoaga, M. J., Trinanés, J., & Goni, G. J. (2020). Improving transport predictions of pelagic Sargassum. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 529, 151398. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151398>
- Rivera-Arriaga, E., Azuz-Adeath, I., Rosas, O. D. C., Espinoza-Tenorio, A., Casarín, R. S., Ortega-Rubio, A., & Vega-Serratos, A. V. B. y. B. E. (2020). Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre
- Una Guía para Tomadores de Decisiones. 894 p.
- Rodríguez-Muñoz, R., Muñiz-Castillo, A. I., Euán-Avila, J. I., Hernández-Núñez, H., Valdés-Lozano, D. S., Collí-Dulá, R. C., & Arias-González, J. E. (2021). Assessing temporal dynamics on pelagic Sargassum influx and its relationship with water quality parameters in the Mexican Caribbean. *Regional Studies in Marine Science*, 48, 102005. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.102005>
- Rutten, J., Arriaga, J., Montoya, L. D., Mariño-Tapia, I. J., Escalante-Mancera, E., Mendoza, E. T., . . . Appendini, C. M. (2021). Beaching and Natural Removal Dynamics of Pelagic Sargassum in a Fringing-Reef Lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(11), e2021JC017636. doi:<https://doi.org/10.1029/2021JC017636>
- Schell, J., Goodwin, D., & Siuda, A. (2015). Recent Sargassum Inundation Events in the Caribbean: Shipboard Observations Reveal Dominance of a Previously Rare Form. *Oceanography*, 28, 8-10. doi:10.5670/oceanog.2015.70
- Takahashi, P. (Agosto, 2021). Resurge el turismo de Puerto Morelos en 2021 tras pandemia y Grace. *Notipress*.
- Trinanés, J., & Goni, G. (2019-2022). Experimental Weekly Sargassum Inundation Report. NOAA, 1.2.
- Van Tussenbroek, B. I., A., H. A. H., R.-M., R. E., E.-A., J., C.-F., H. M., G.-G., . . . Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by Sargassum spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine pollution bulletin*. 272-281.
- Visitmexico. (2019). Puerto Morelos
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science of The Total Environment*.
- Woodcock, A. H. (1993). Winds subsurface pelagic Sargassum and Langmuir circulations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 170(1), 117-125. doi:[https://doi.org/10.1016/0022-0981\(93\)90132-8](https://doi.org/10.1016/0022-0981(93)90132-8)
- Van Tussenbroek, B. I., Arana, H. A. H., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., ... y Collado-Vides, L. 2017. *Severe impacts of brown tides caused by Sargassum spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. Marine pollution bulletin*, 122(1-2), 272-281.

Anexos

Anexo 1: La problemática de las arribaciones masivas de sargazo en México

Características biofísicas del sargazo

El sargazo es una macroalga marina que flota por los océanos y es transportada por las corrientes marinas. Las corrientes marinas pueden cambiar su curso debido a diversos cambios en la hidrodinámica marina, como lo es el cambio de temperatura en el agua.

De forma general, el sargazo pertenece al grupo de algas cafés o pardas (*Phaeophyta*) que habitan en los mares de todo el mundo. El subgrupo de sargazo pelágico, es decir, el que flota de manera libre en el océano, se compone de dos especies: *Sargassum natans* y *S. fluitans*, son típicamente de color café pálido-amarillento de 20 a 80 cm de diámetro y se configuran a partir de un tallo ramificado de follaje abundante con filoides acerrados y numerosos nematocistos de menos de 1 cm de diámetro. ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)). En la se muestran ambas especies Figura 1.

Crece generalmente colonias. Es largo, con hojas de forma oval sus colores son tonos de marrón a oliva oscuro e inconfundiblemente marcados con venas centrales blancas. Hojas unidas para suavizar, sus tallos son cilíndricos. Puede ser un poco espeso. Suelen medir de 30 a 45 cm de largo y habita en profundidades de hasta 90 cm. ([contributors, 24 enero 2022 00:58 UTC](#)).

La composición de las formas de sargazo difiere notablemente según la región. Se muestra en la Figura 27, una comparación entre las distintas especies. *S. natans* VIII dominó el Atlántico tropical occidental (87.3% de peso húmedo), el Caribe oriental (95,3% de peso húmedo) y la corriente de las Antillas (92.0% de peso húmedo). Por el contrario, *S. natans* I dominó el Mar de los Sargazos Sur (87.5% de peso húmedo). La proliferación observada de *S. natans* VIII en tres de estas regiones es significativa dada su baja abundancia histórica y su rara aparición limitada al Caribe occidental (Parr, 1939). ([Schell et al., 2015](#)). En la *Figura 28*, que se muestra a continuación, se aprecia su distribución, es decir, la proporción de cada forma de sargazo (*S. fluitans*, *S. natans* I Parr y *S. natans* VIII Parr) observada en cuatro regiones del Atlántico Norte occidental. Los límites regionales se indican con líneas horizontales. Se alade una gráfica con la densidad total (g/m^2) y el error estándar del sargazo recogido en el Atlántico tropical occidental y en el Mar de los Sargazos Sur durante el periodo de estudio histórico de la Asociación de Educación Marina y los dos eventos de inundación recientes.



Figura 27. Comparación entre especies de Sargazo. (Schell et al., 2015)

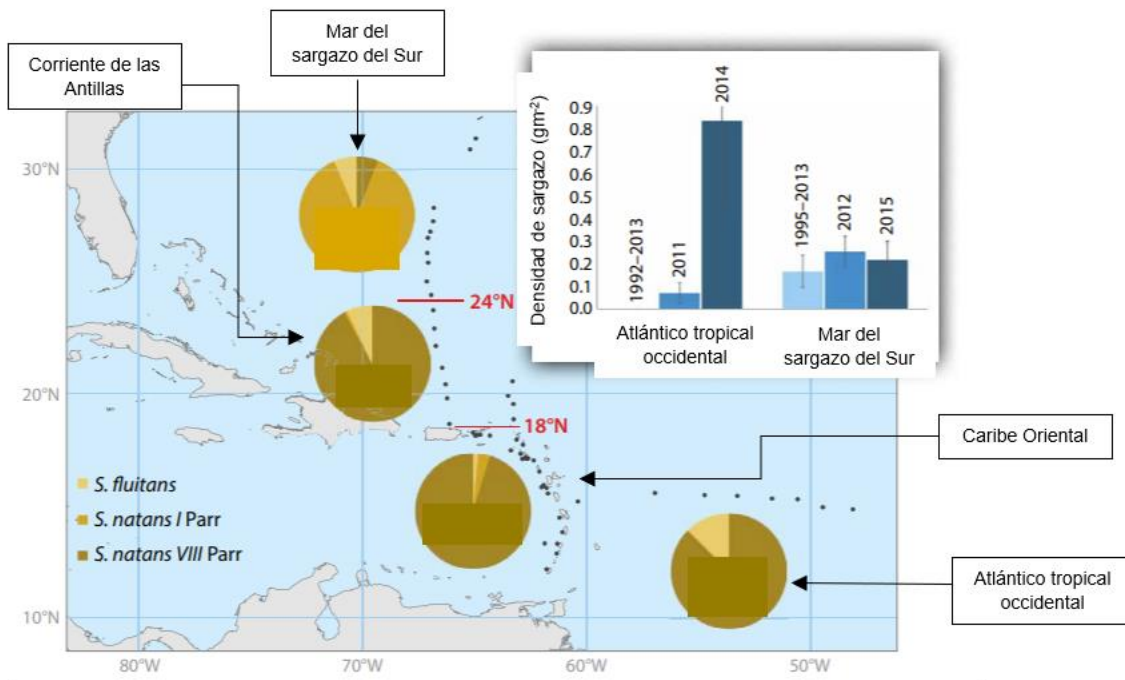


Figura 28. Panel del mapa: Proporción de cada forma de sargazo (*S. fluitans*, *S. natans* I Parr y *S. natans* VIII Parr), modificada de: (Schell et al., 2015)

La reproducción de ambas especies de sargazo es por fragmentación vegetativa. Este es un tipo de reproducción asexual, en la cual se da la ruptura o fragmentación de un

organismo, formando nuevos individuos. Se genera una “clonación” de la especie al regenerarse un individuo nuevo, completamente idéntico al parental. Aunado a esto, este organismo no requiere de condiciones especiales para llevar a cabo esta fragmentación. Sus requerimientos de nitrógeno y fósforo son mínimos, por tal, encuentra oportunidades de crecimiento en aguas ligeramente enriquecidas como zonas frontales o plumas de ríos crecimiento óptimo sucede a temperaturas entre 24° y 30° C y con salinidades de 36 y hasta 42 partes por mil. Así, el sargazo puede duplicar su masa hasta en 10 días. ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Los volúmenes de sargazo que llegan por el océano Atlántico han aumentado en los últimos años. En el año 2011 se comenzaron a notar arribazones anormales o masivas de sargazo tanto en las costas mexicanas como otras costas del mundo, incluidos países del sur como Costa Rica ([CONACYT, 2019](#)).

Ésta macroalga marina conforma un ecosistema en el cual muchas especies se ven beneficiadas, éste ha sido denominado como un “hábitat esencial para los peces”; existen al menos 10 especies de invertebrados y 2 de vertebrados que son endémicos del sargazo ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)), además, el Laboratorio de Investigación de la Costa del Golfo de la Universidad del Sur de Mississippi ha identificado 122 especies de peces que dependen del Sargassum, durante todo o parte de su ciclo vital ([Hu et al., 2016](#)). Otras especies lo utilizan como refugio como lo hacen las tortugas marinas.

Al llegar el sargazo a las costas, las dunas pueden aprovechar este recurso al servirles de abono. Franjas de sargazo pueden servir como protección para las costas, también puede utilizarse como alimento, combustible y, posiblemente, como material farmacéutico (por ejemplo, [Milledge et al., 2015](#)). Aunado a esto, el sargazo sirve como modo de transporte para muchos nutrientes y sedimentos.

El cambio climático juega un papel importante en el transporte del sargazo por el océano y su arribo a distintas costas, además de que contribuye a su reproducción. Esto debido a que el cambio climático está elevando la temperatura de los mares, efecto que beneficia a la reproducción del sargazo, además de fomentar los episodios de blanqueo y la aparición de huracanes ([Chávez et al., 2020](#)).

Sin embargo, existen puntos negativos del sargazo, debidos en su mayoría a su rápida y fácil reproducción (condiciones poco demandantes), lo cual hace que crezca en volumen en poco tiempo.

Algunos de los problemas que se observan en alta mar es, que la franja de sargazo flotante atrapa desechos plásticos e hidrocarburos, fomentando la contaminación marina y sus ecosistemas ([Calzada & Marín-Antuña, 2004](#)). Sin embargo, la problemática más notoria se da cuando el sargazo llega a las costas.

Entre los muchos daños que causa, se encuentra el daño a los ecosistemas costeros; la modificación en la calidad del agua([Chávez et al., 2020](#)); daño de los corales por la producción de lixiviados por su descomposición, además de otros gases liberados en el

mismo proceso ([Aguilera, 2016](#)); en ocasiones genera el efecto de eutrofización, afectando a otras especies tanto vegetales como animales ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Todo esto sin mencionar las implicaciones que afectan al turismo; que son desde el mal olor, hasta un paisaje poco atractivo y la producción de ciertos gases, que en ciertas concentraciones, llegan a ser tóxicos, dañando la salud humana ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)), ([CONACYT, 2019](#)).

Existen alternativas para tratar el sargazo y una de ellas consiste en al ser biomasa, utilizarlo como tal para la producción de energías renovables. También puede funcionar como abono, para hacer fertilizantes e inclusive fármacos, como ya se mencionó anteriormente.

Se debe combatir esta problemática no sólo cuando ya arribó sino más bien se ha de tratar el posible desvío de las masas de sargazo, evitando su llegada a las costas.

Origen de la problemática del sargazo, hallazgos y cifras

En los últimos años se ha dado un incremento exponencial en las cantidades de sargazo registradas. Para el año 2018, particularmente los meses de agosto y septiembre, todas las costas del Caribe superaron los registros históricos ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)). El origen del sargazo es en el Atlántico tropical, como esta especie no tiene barreras físicas, es decir, no depende del suelo para su reproducción, pues flota, puede darse un crecimiento ilimitado, en donde exista tanto sargazo que comience a dañar los ecosistemas; situación que se vive en la actualidad. La alta tasa de deforestación de la selva amazónica, fomenta la producción de sargazo, ya que los aportes continentales de nitritos y fosfatos se filtran y eutrofizan cuerpos de agua. Como consecuencia, arrecifes de coral y pastos marinos se ven afectados, además de otros daños más, mencionados en este trabajo ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Todo empezó desde el verano del 2011, hace 10, casi 11 años, cuando arribaron cantidades mayores a las observadas. El arribo masivo sin precedentes de sargazo a las islas del Caribe se observó en 2011, 2015 y 2018 (unep, 2018). El sargazo se distribuye en el Atlántico Sur Tropical y en el Atlántico Norte, incluido el mar de los Sargazos, en un área de 2 millones de kilómetros cuadrados en las aguas cálidas del océano Atlántico, pero en los últimos años, ha habido varios episodios inusuales de cantidades excesivas de dos especies de sargazo: *S. natans* y *S. fluitans* ([Gower y King, 2011](#)), ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Actualmente se han invertido cientos de millones de pesos para la recolección de esta macroalga (300 millones de pesos, en el 2018([Expansión, 2018](#); [Varillas, 2019](#))); se instalaron barreras de diversos tipos, se utilizaron maquinarias para recolectar en playa y en agua el exceso de sargazo. Sin embargo, este dinero cae en manos de empresas que ofrecen sistemas de recolección del sargazo sin planeación estratégica ni visión integral de futuro, así como con mínimas herramientas de regulación de la atención en playa y mar, sin criterios científicos robustos para la toma de decisiones ni para la evaluación de las consecuencias que las acciones reactivas tienen sobre algunos ecosistemas; Es hora de detener estas inversiones a grupos sin experiencia; pues al final de cuentas, el costo por la rehabilitación de las playas terminará siendo más caro ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Desde el 2019, la Secretaría de Marina ha quedado a cargo del manejo integral del problema, con grandes limitantes en los recursos asignado y sin experiencia específica sobre el sargazo. Se debería apostar por un manejo integral del sargazo; basándose en la investigación del tema. Se busca generar un sistema integral de alerta temprana, con ayuda de la detección a partir de imágenes satelitales e inclusive con el apoyo de drones (sin embargo, el uso de esta tecnología resulta costoso además de que sería difícil sistematizarlos), que den una buena cobertura de las zonas de interés ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Es preciso contar con una estructura que asegure la gestión de playas; en donde se analicen las causas de la proliferación del sargazo, teniendo como objetivo, encontrar la

raíz del problema. En México, la norma de calidad y sustentabilidad de playas (dof, 2016), la certificación internacional “Blue Flag” (Blue flagfee, 2018), el Programa Playas Limpias (conagua, 2017) y los Comités de Playas Limpias (conagua, 2005), conforman la estructura de gobernanza en la que opera la gestión de playas recreativas ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

La SEMARNAT (2019) ha publicado los lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por el sargazo en el caribe mexicano y el golfo de México. En ese documento se menciona la importancia de las dunas costeras, las acciones que se deben evitar durante la limpieza del sargazo de la playa que dañan las dunas costeras y la importancia de las mismas en estado saludable para la anidación de las tortugas marinas ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)). Se puede consultar este documento en la liga siguiente: ([SEMARNAT, 2021](#)).

Los arribos masivos de sargazo en las costas mexicanas se reportaron particularmente en playas del norte de Quintana Roo, donde afectó de manera “importante” a la industria del turismo de playa ([Rodríguez-Martínez et al., 2016](#)).

La zona de mayor acumulación de sargazo flotante se detectó en el canal de Cozumel, entre la isla y el municipio de Solidaridad en Quintana Roo. En esta área se reconocen características oceanográficas particulares a nivel de mesoescala ([Chávez et al., 2003](#); [Carrillo et al., 2017](#); [Alcérreca-Huerta et al., 2019](#)), las cuales se asume son responsables de esta acumulación máxima en relación con el resto de la región ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

En la configuración espacial regional se observan zonas de alta acumulación de sargazo en zonas oceánicas alrededor de 100 km de distancia de la línea de costa, tales agregaciones tienen el potencial de derivar hacia la costa por efecto de las corrientes superficiales, particularmente en el sur de Quintana Roo ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Se sugiere la estructuración de patrones lineales de ocurrencia de sargazo con orientación sureste – noroeste desde la zona oceánica (a más de 50 km de la costa) hacia el litoral mexicano ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Un sistema integral de alerta temprana debe conjuntar los datos satelitales y las mediciones que provean un panorama integral de las condiciones circulares reales. Debe considerar las condiciones reales atmosféricas y oceanográficas registradas con sensores ad hoc, que incorporen todos los forzantes de la circulación superficial del mar ([Flores-Vidal, et al., 2015, 2018](#)), ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)).

Una red de sensores, es la colección de un conjunto de nodos sensores que se despliegan en una región en particular. Las redes de sensores ad hoc, consideradas altamente distribuidas, están constituidas por nodos pequeños (inalámbricos) y de peso ligero, que se despliegan en un área específica, Su función es proveer una infraestructura de comunicación inalámbrica para poder monitorear algo en específico, en este caso el sargazo.

Con base en el informe de la unep (2018), no es posible realizar un pronóstico a largo plazo de las proliferaciones de sargazo sin entender qué causó su incremento masivo y las fluctuaciones anuales en años anteriores. Las posibles causas de la proliferación masiva del sargazo requieren más investigación científica y para ello se han planteado las siguientes hipótesis de trabajo ([Rivera-Arriaga et al., 2020](#)):

- Calentamiento y cambio de la temperatura del océano debido a los ciclos a largo plazo, como la Oscilación Meridional del Atlántico o amo, y / o el cambio climático global.
- Cambios en la circulación oceánica. Las siguientes causas son especulaciones, pero no está claro si juegan un papel importante y quizás incluso improbable.
- Aumento de nutrientes y contaminantes en tierra (que incluyen fertilizantes y aguas residuales con alto contenido de nitrógeno) que son vertidos al océano.
- Transferencia de nutrientes del polvo rico en hierro de ríos (Congo, Amazonas y noroeste de África).
- El tráfico marítimo como potencial vector de introducción.

Sargazo y turbidez del agua

La descomposición del sargazo genera una pérdida en la transparencia del agua; la aparición de lixiviados vuelve al agua turbia. De esta manera es posible crear una relación entre la presencia de sargazo y la turbidez del agua. Para determinar la relación entre la cobertura de sargazo y la turbiedad del agua, se utilizaron modelos de regresión simple, con ayuda de imágenes satelitales ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)).

La turbidez puede calcularse a partir de la combinación de bandas multiespectrales en imágenes de satélite, sin necesidad de realizar mediciones in situ.

En un estudio de 3 playas mexicanas, Xcalak; Mahahual; y Xahuayxol, se midieron algunas concentraciones de distintos parámetros, según la presencia de sargazo y la proximidad de las distintas zonas a la línea de costa ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)). Se distinguieron dos zonas en el primer alcance, a 5 y 15 metros de la línea de costa; y en la segunda sección se analizaron 3 zonas, de 10, 20 y 100 metros de distancia a la línea de costa respectivamente ([Rodríguez-Muñoz et al., 2021](#)). Las concentraciones encontradas se muestran en la Tabla 4 y la Tabla 3.

Los resultados sugieren que la zona más cercana a la costa, tiene un rango de cambio en turbidez en función del sargazo seis veces mayor respecto a zonas más alejadas.

| Zona | Oxígeno disuelto (mg/L) | Sólidos disueltos totales (g/L) |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Xcalak | | |
| zona 1 | 0.17 ± 0.15 | 37.59 ± 0.66 |
| zona 2 | 3.42 ± 0.38 | 36.84 ± 0.30 |
| mananuai | | |
| zona 1 | 0.05 ± 0.04 | 36.37 ± 0.04 |
| zona 2 | 4.16 ± 0.72 | 36.47 ± 0.03 |
| Xahuayxol | | |
| zona 1 | 0.29 ± 0.41 | 35.50 ± 0.06 |
| zona 2 | 2.62 ± 0.16 | 35.57 ± 0.07 |

Tabla 4. Valor medio y desviación estándar de oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos en dos zonas (5 y 15 m de la costa) de las tres lagunas de arrecife. Modificada de (Rodríguez-Muñoz et al., 2021).

| Zona | pH | NH ₄ (μ mol/L) | Fosfato (μ mol/L) |
|------------------|-------------|---------------------------|-------------------|
| Xcalak | | | |
| zona 1 | 7.72 ± 0.06 | 1.96 ± 1.27 | 0.57 ± 0.33 |
| zona 2 | 7.87 ± 0.08 | 1.22 ± 0.85 | 0.24 ± 0.18 |
| zona 3 | 7.93 ± 0.01 | 0.65 ± 0.34 | 0.20 ± 0.06 |
| Mahahual | | | |
| zona 1 | 7.83 ± 0.06 | 2.59 ± 0.77 | 0.31 ± 0.12 |
| zona 2 | 7.95 ± 0.06 | 1.29 ± 0.89 | 0.23 ± 0.14 |
| zona 3 | 8.04 ± 0.01 | 0.37 ± 0.18 | 0.27 ± 0.05 |
| Xahuayxol | | | |
| zona 1 | 7.98 ± 0.04 | 0.75 ± 0.69 | 0.27 ± 0.12 |
| zona 2 | 8.01 ± 0.05 | 0.45 ± 0.25 | 1.30 ± 1.5 |
| zona 3 | 8 ± 0.06 | 0.69 ± 0.75 | 0.53 ± 0.34 |

Tabla 3. Valor medio y desviación estándar de pH, NH₄ y fosfato en tres zonas (10, 20 y 100 m después de la playa) de las tres lagunas de arrecife. Modificada de (Rodríguez-Muñoz et al., 2021).

Se observó que la cobertura de sargazo y la turbidez del agua presentaron una variación interanual durante la temporada considerada. Los resultados mostraron valores máximos de cobertura de sargazo y turbidez durante el mes de enero, 2019. Mientras que en los meses de abril, mayo y junio se observaron los valores más bajos para ambas variables (Rodríguez-Muñoz et al., 2021).

Cabe mencionar que la turbidez en el verano también se puede deberse al drenaje del agua de lluvia que desemboca en el mar con materia orgánica en suspensión (Fabricius et al., 2005; Mariño-Tapia et al., 2011; Ogston et al., 2004; Rodríguez Juárez, 2011); además de las temporadas de tormentas y huracanes, las cuales causan un incremento en la altura de ola y mareas de tormenta (Silva et al., 2009). En invierno, los fuertes vientos causan la resuspensión de sedimentos, quitando transparencia al agua (Aranda-Cicerol et al., 2006; Herrera-Silveira et al., 1999).

Una vez que el sargazo llega a la costa, comienza a descomponerse después de cierto tiempo, al quedar varado (Chávez et al., 2020). Por el contrario, en el océano, se mantiene en constante movimiento, impidiendo su descomposición.

En resumen, en dicho estudio se observó una disminución de las concentraciones de oxígeno disuelto y del pH y un aumento de las concentraciones de amonio en las zonas con mayor acumulación de esta alga y efecto de los lixiviados (Rodríguez-Muñoz et al., 2021). De esta forma, se sugiere que un sistema automatizado de alerta temprana de sargazo incluya la turbidez del agua como medida complementaria (Rodríguez-Muñoz et al., 2021).

Anexo 2: Tablas comparativas de distintos parámetros del oleaje entre datos de la NOAA y el Era5

Parámetros analizados

- Dirección del viento (°)
- Velocidad del viento (m/s)
- Altura de ola significativa (m)
- Periodo Pico (s)
- Dirección del oleaje (°)

Las tablas que se exponen a continuación muestran datos de 5 años distintos donde se detectaron distintos fenómenos; como lo son el fenómeno del niño y de la niña (2015 y 2010 respectivamente), y años de fuertes huracanas, con excepción del año 2018 que fue tomado como año “neutro”.

Dirección del viento (°)

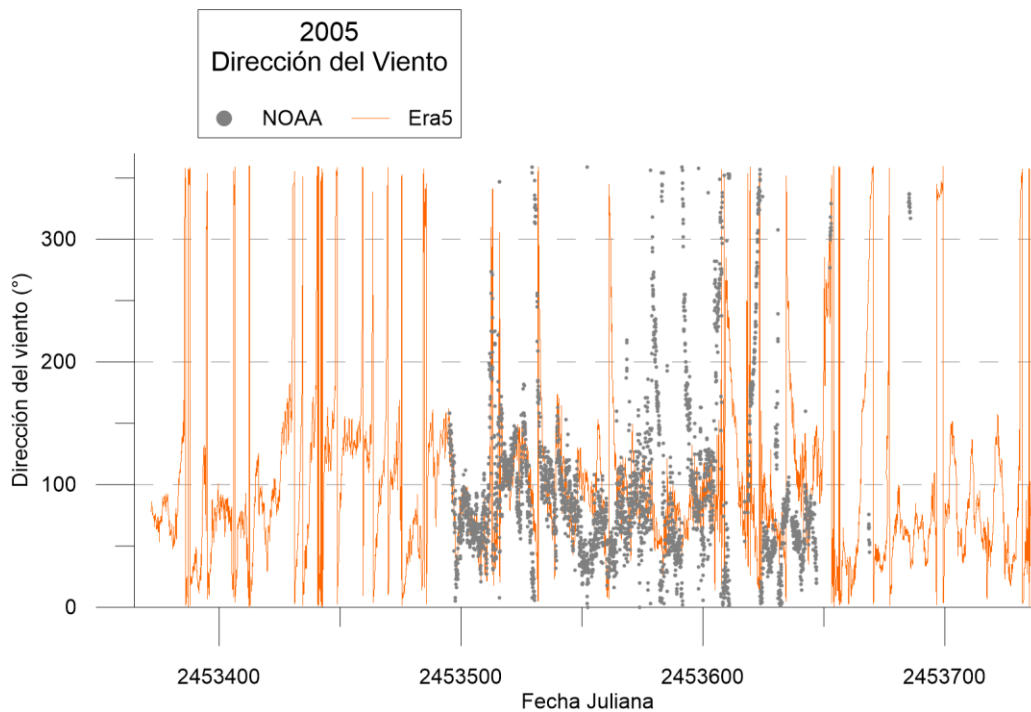


Figura 29. Dirección del viento - 2005

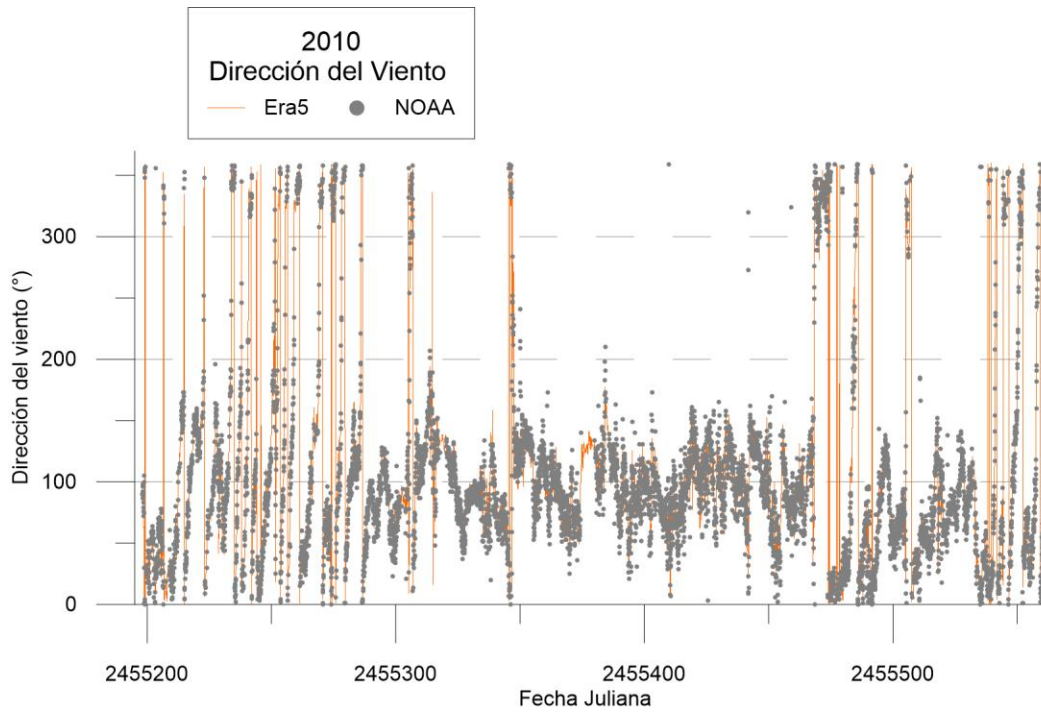


Figura 30. Dirección del viento - 2010

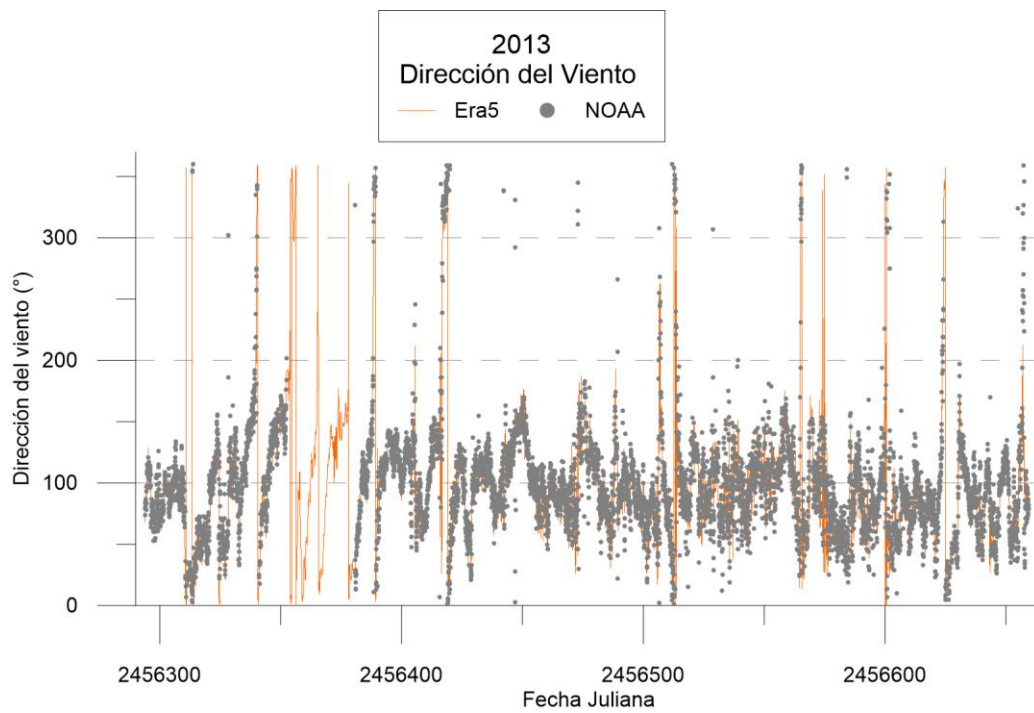


Figura 31. Dirección del viento - 2013

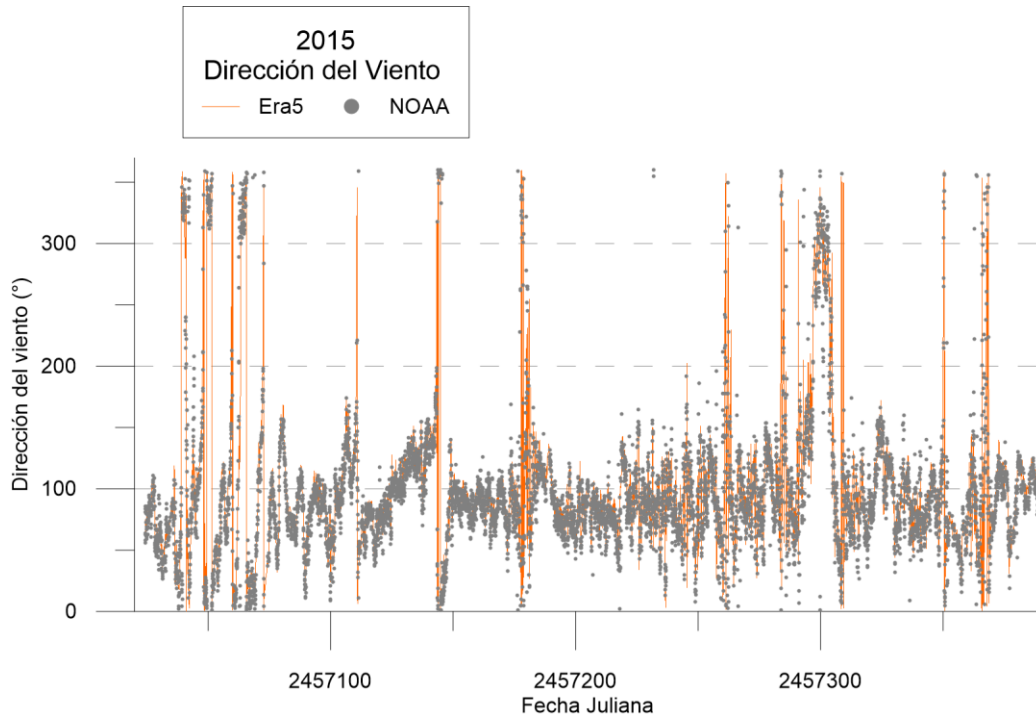


Figura 32. Dirección del viento - 2015

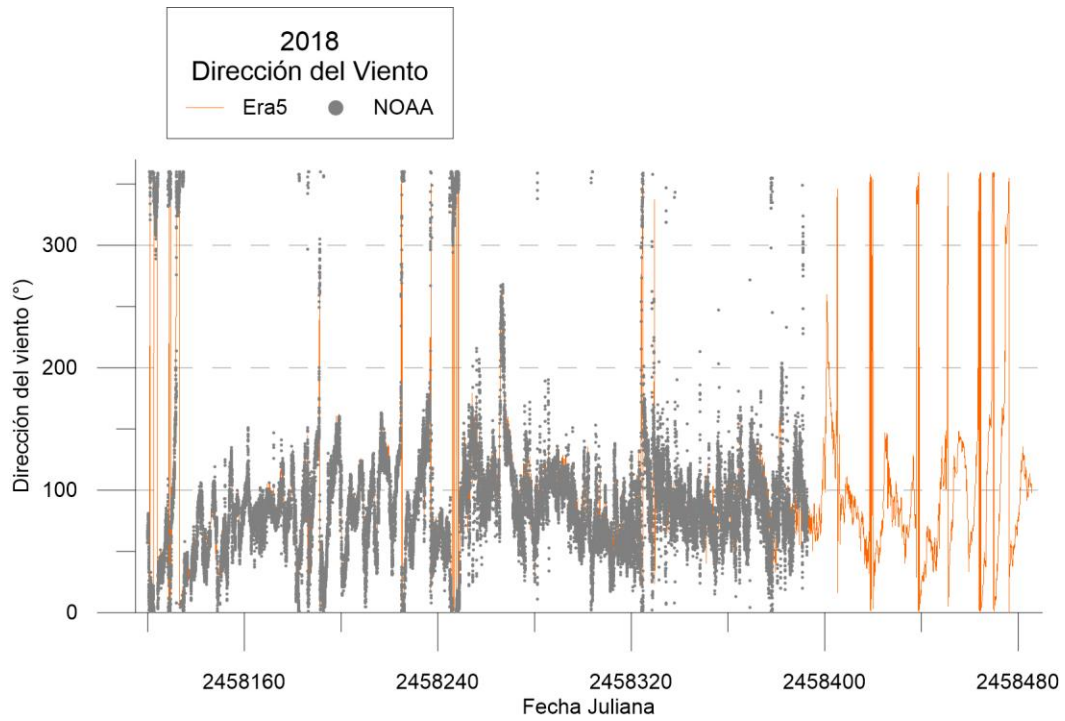


Figura 33. Dirección del viento – 2018

Velocidad del Viento (m/s)

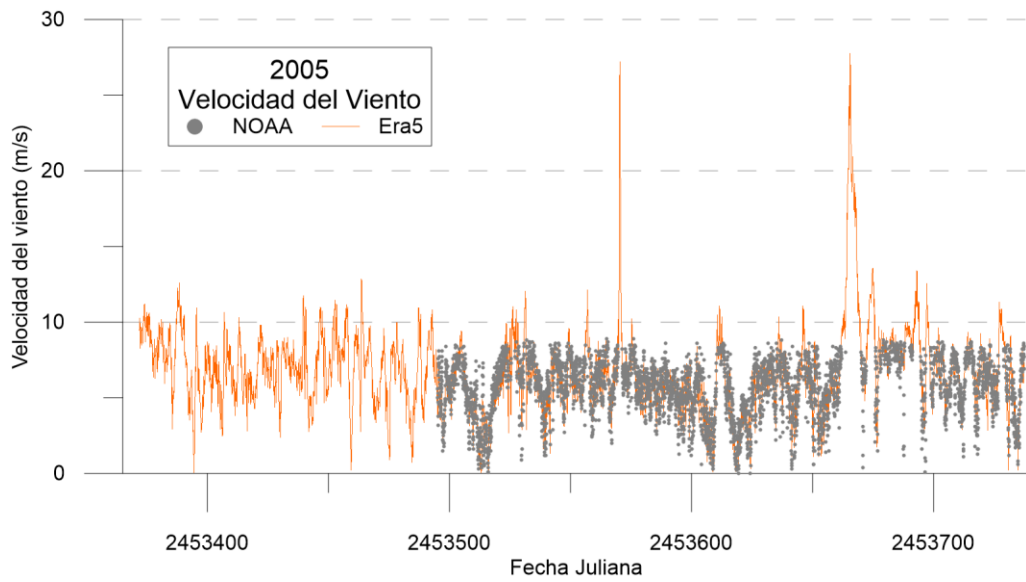


Figura 34. Velocidad del viento - 2005

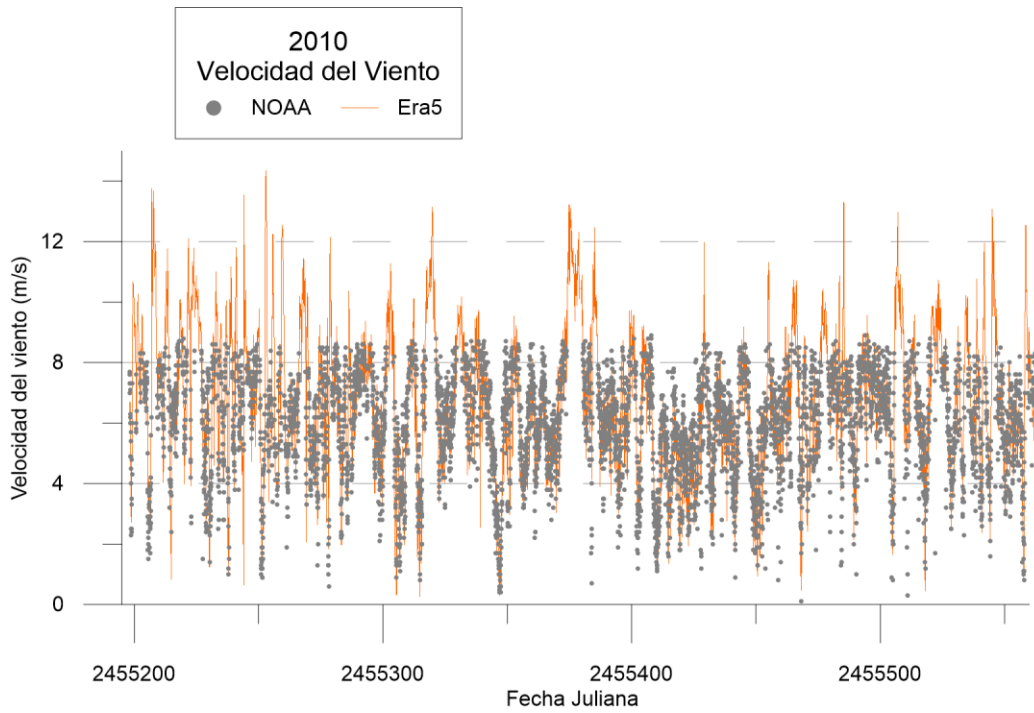


Figura 35. Velocidad del viento - 2010

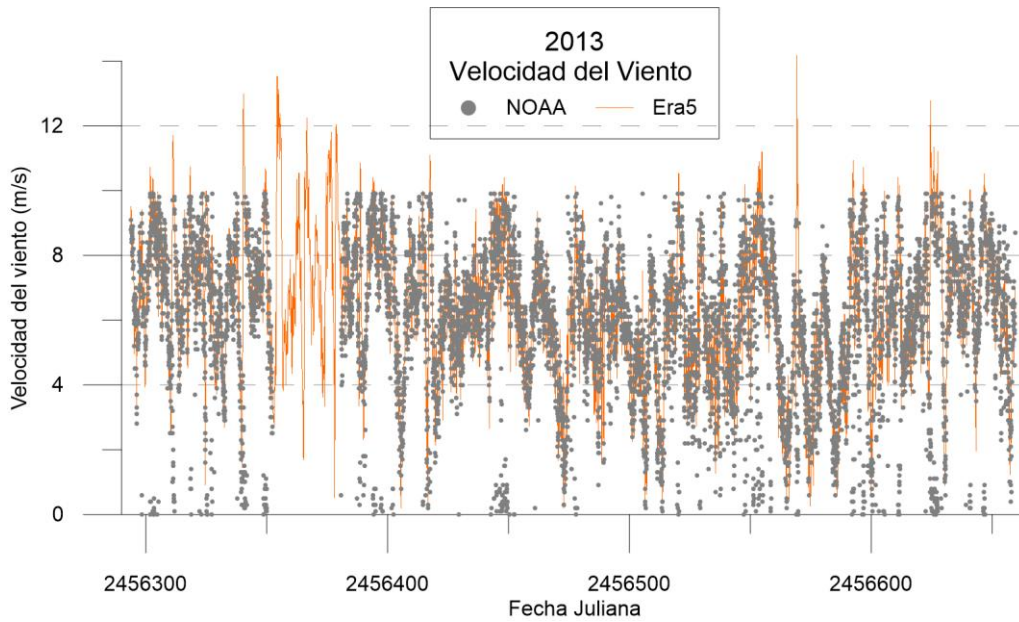


Figura 36. Velocidad del viento - 2013

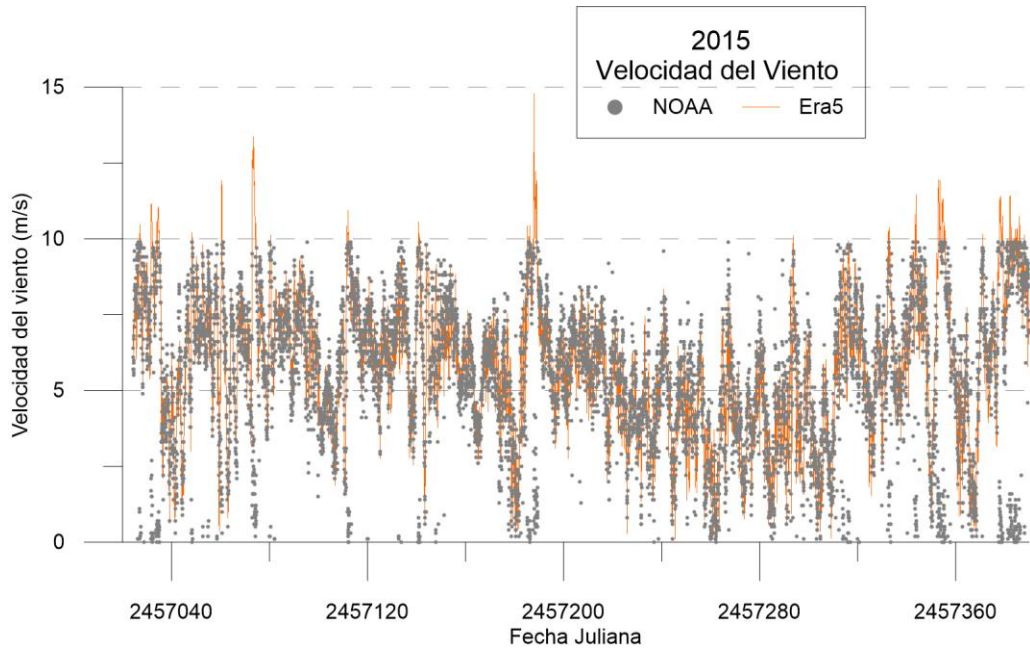


Figura 37. Velocidad del viento - 2015

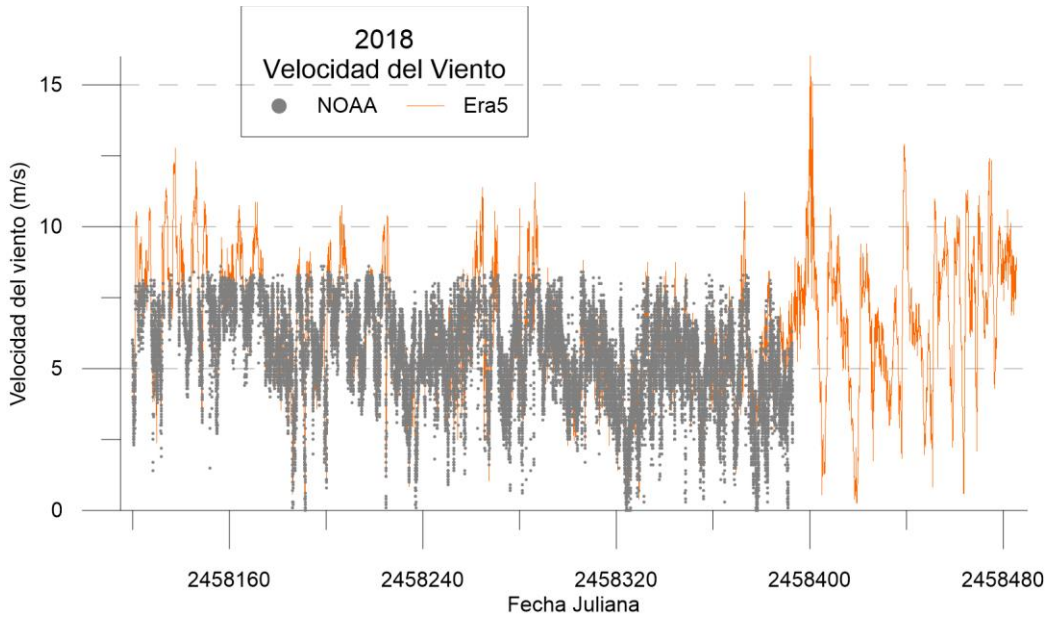


Figura 38. Velocidad del viento - 2018

Altura de ola significativa (m)

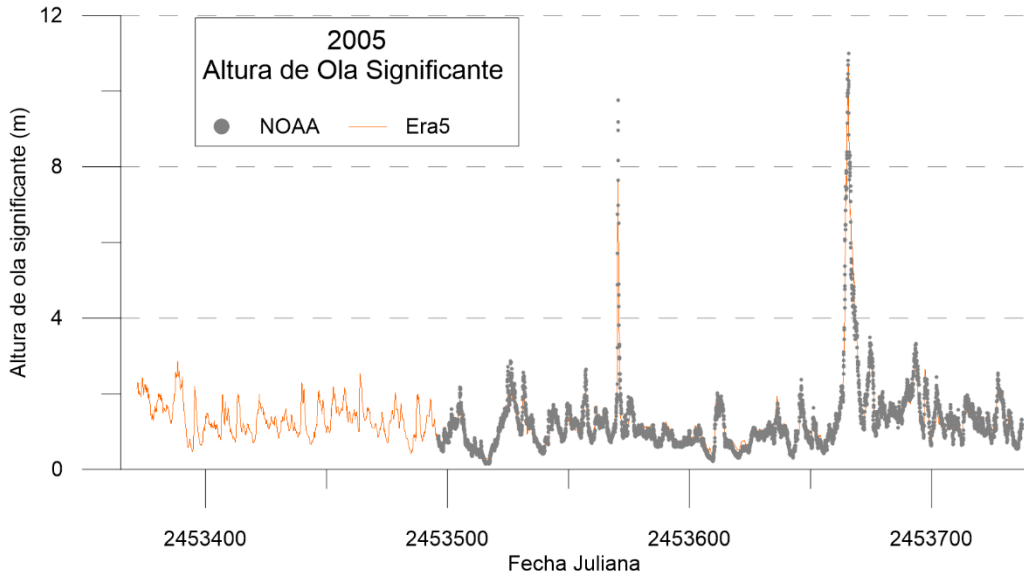


Figura 39. Altura de ola significativa - 2005

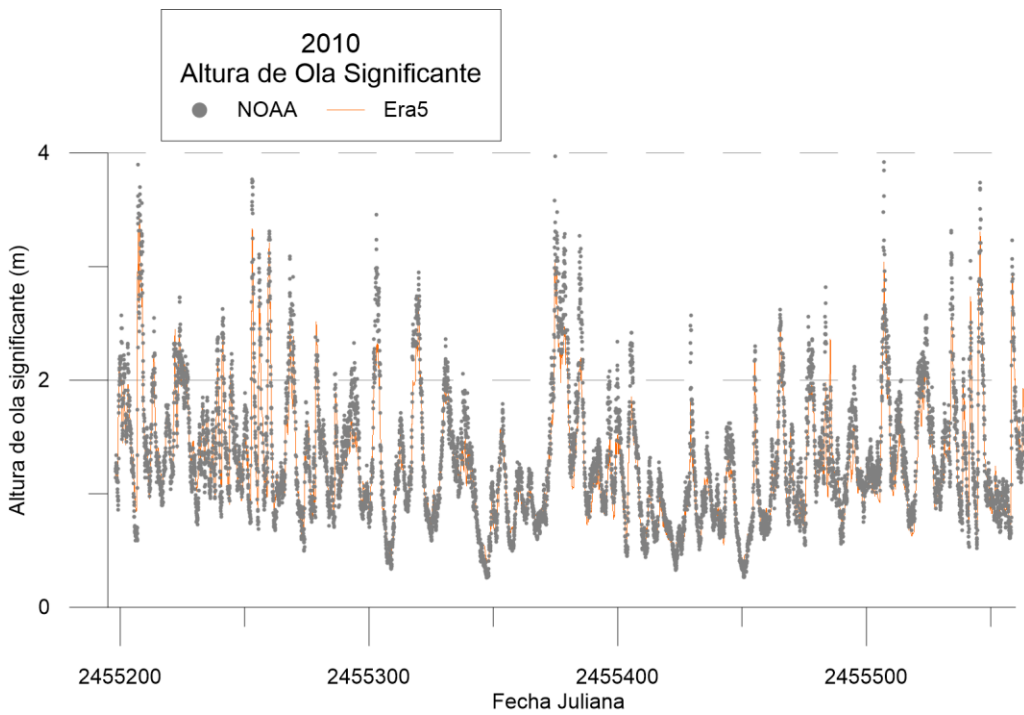


Figura 40. Altura de ola significativa - 2010

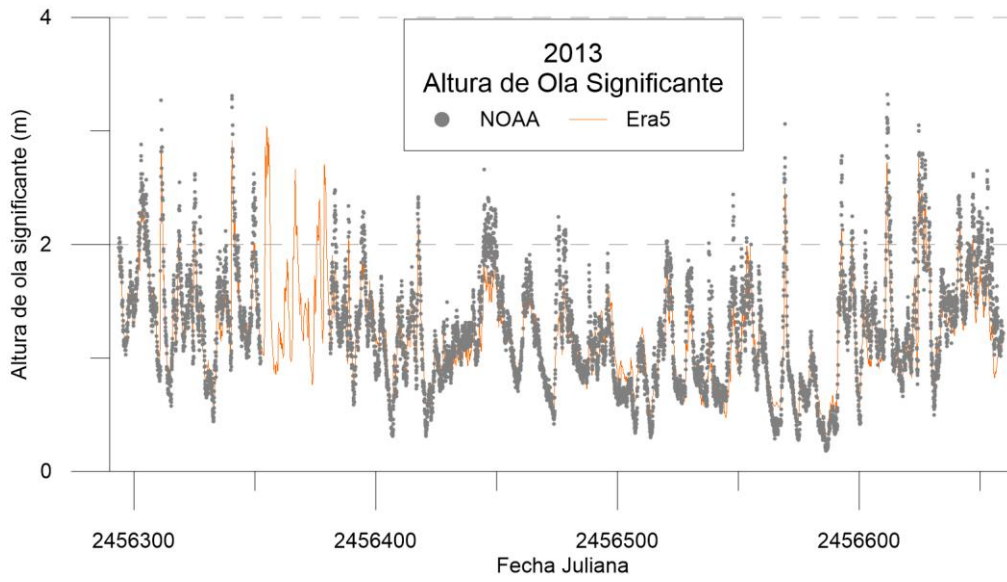


Figura 41. Altura de ola significativa - 2013

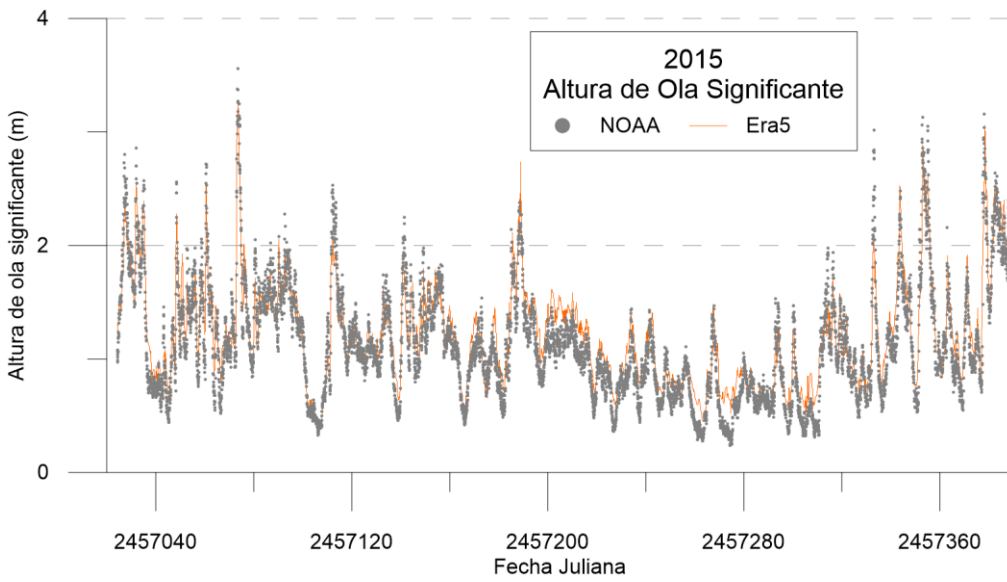


Figura 42. Altura de ola significativa - 2015

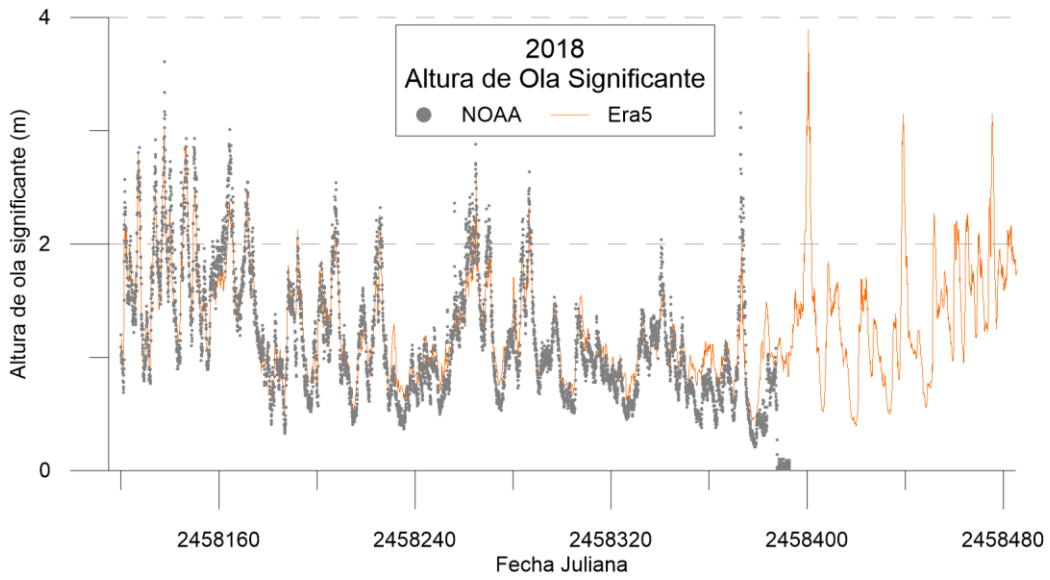


Figura 43. Altura de ola significativa - 2018

Periodo pico (s)

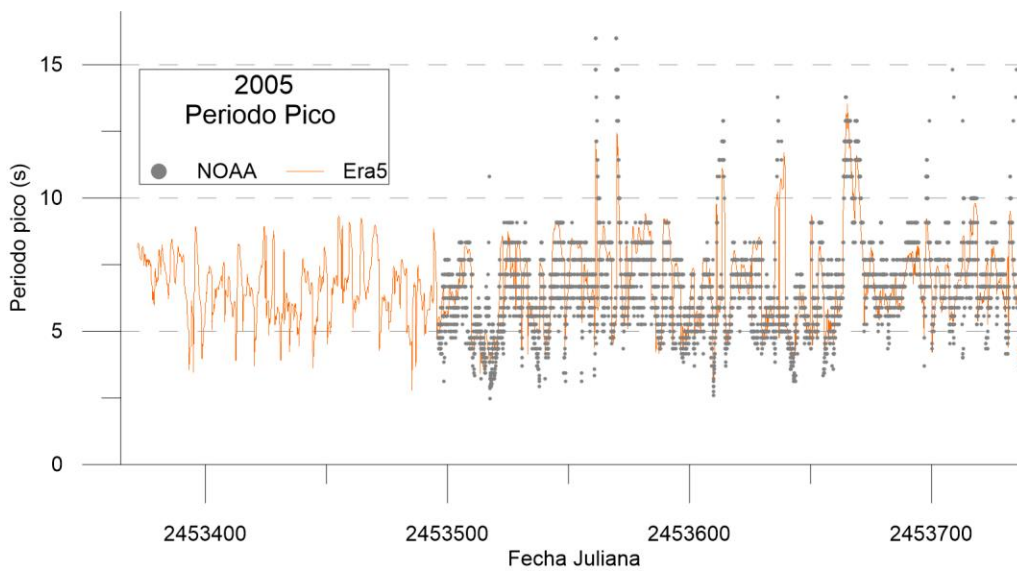


Figura 44. Periodo pico - 2005

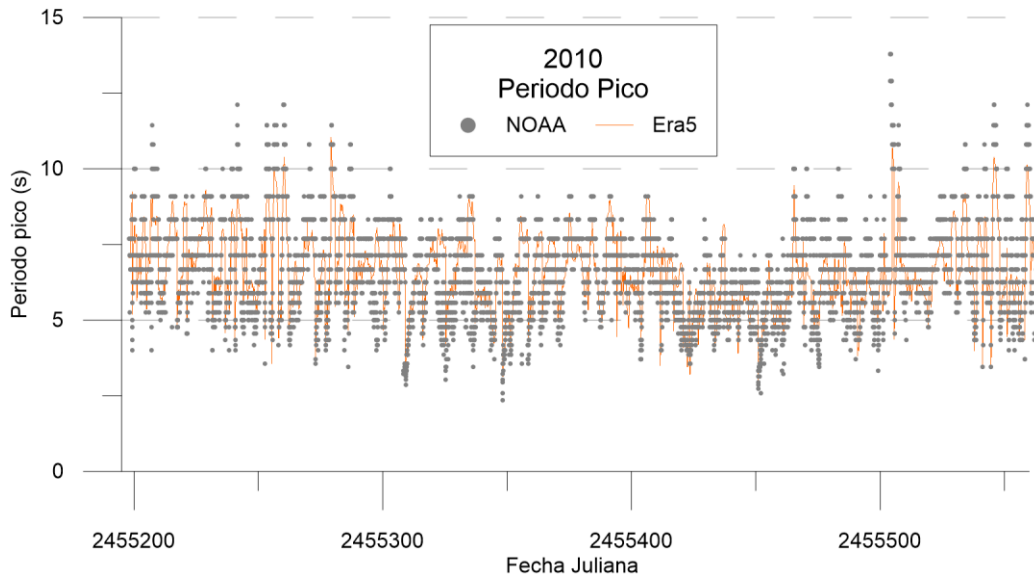


Figura 45. Periodo pico - 2010

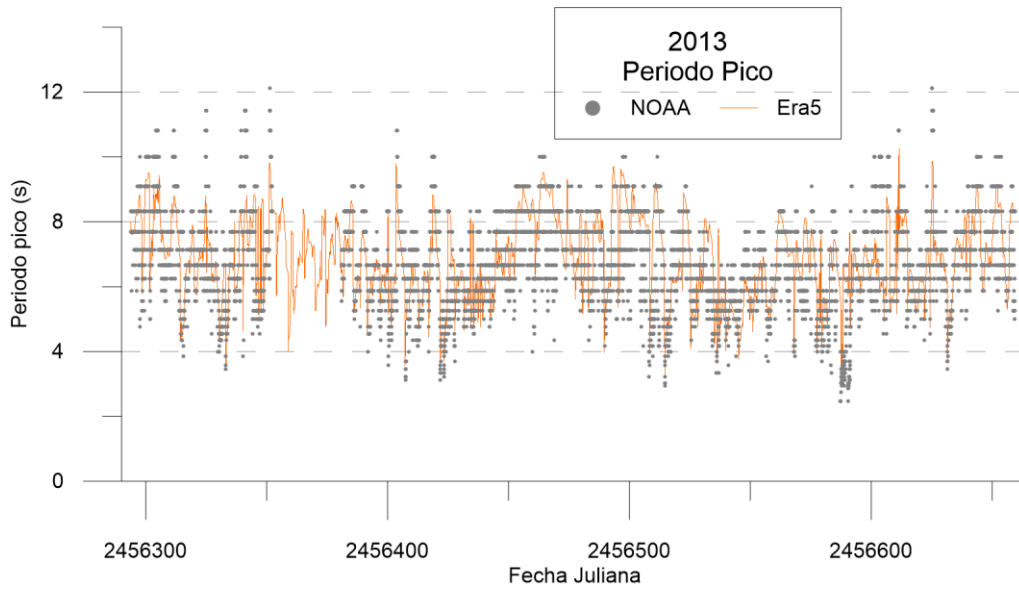


Figura 46. Periodo pico – 2013

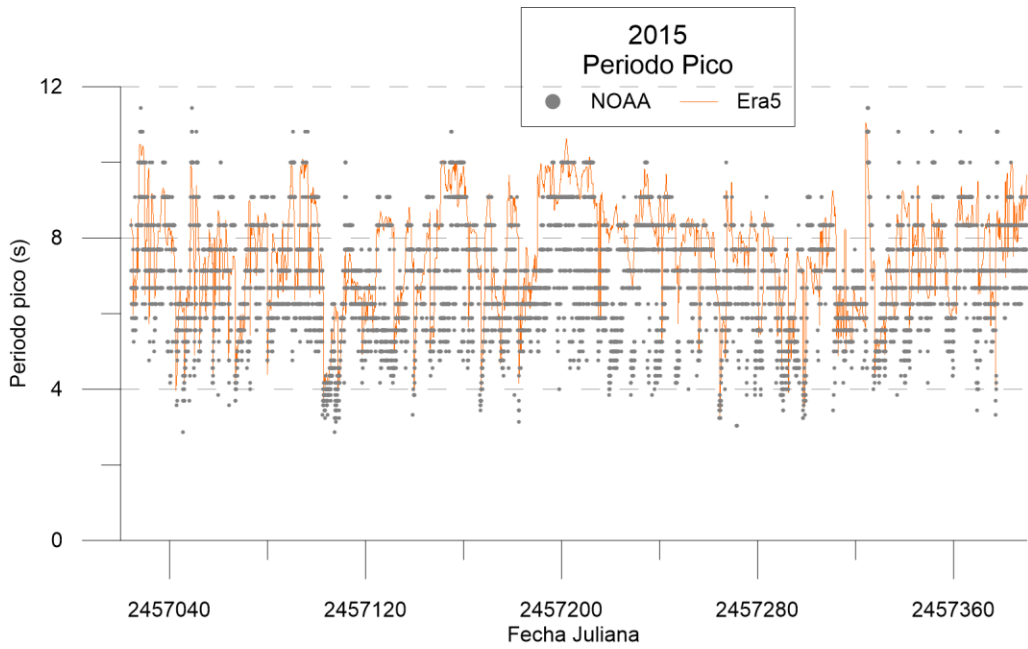


Figura 47. Periodo pico – 2015

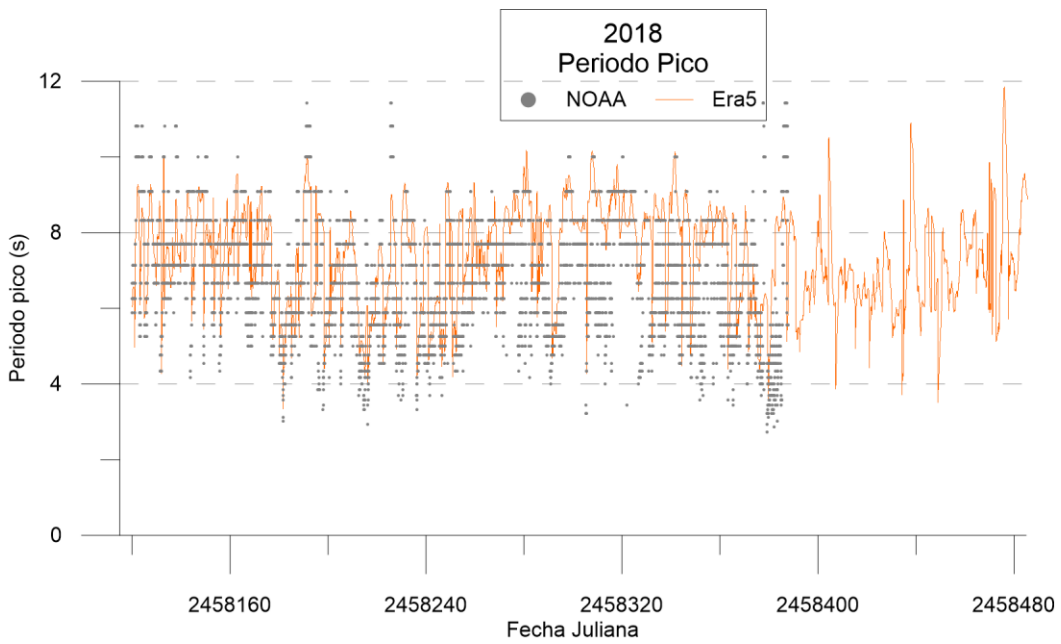


Figura 48. Periodo pico - 2018

Dirección del oleaje (°)

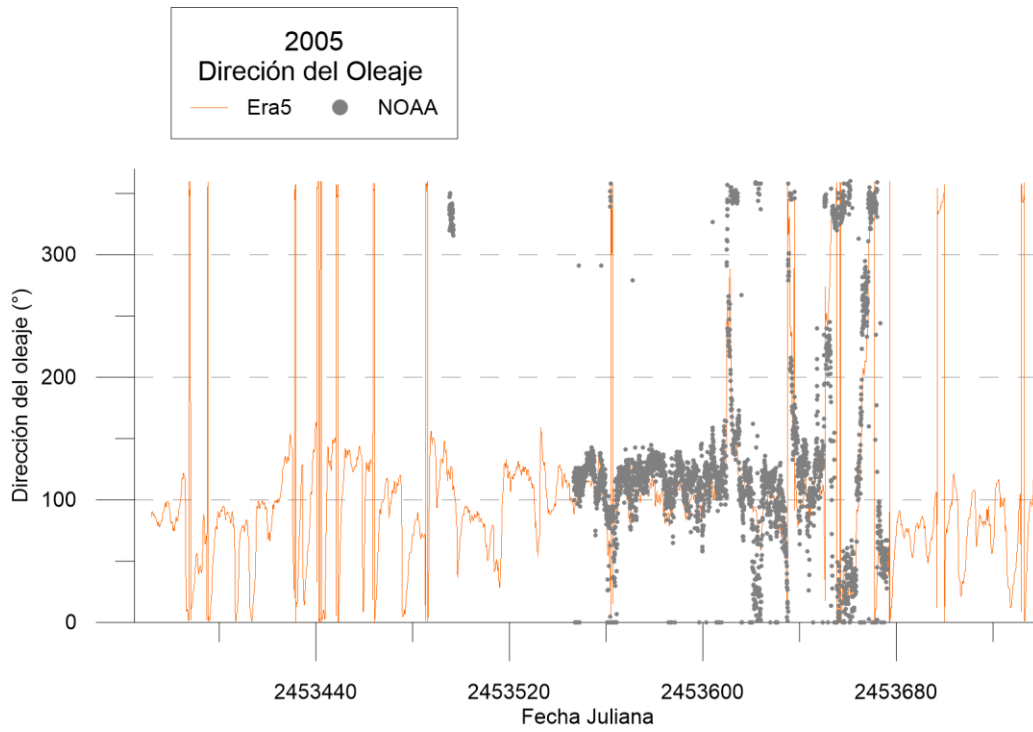


Figura 49. Dirección del oleaje - 2005

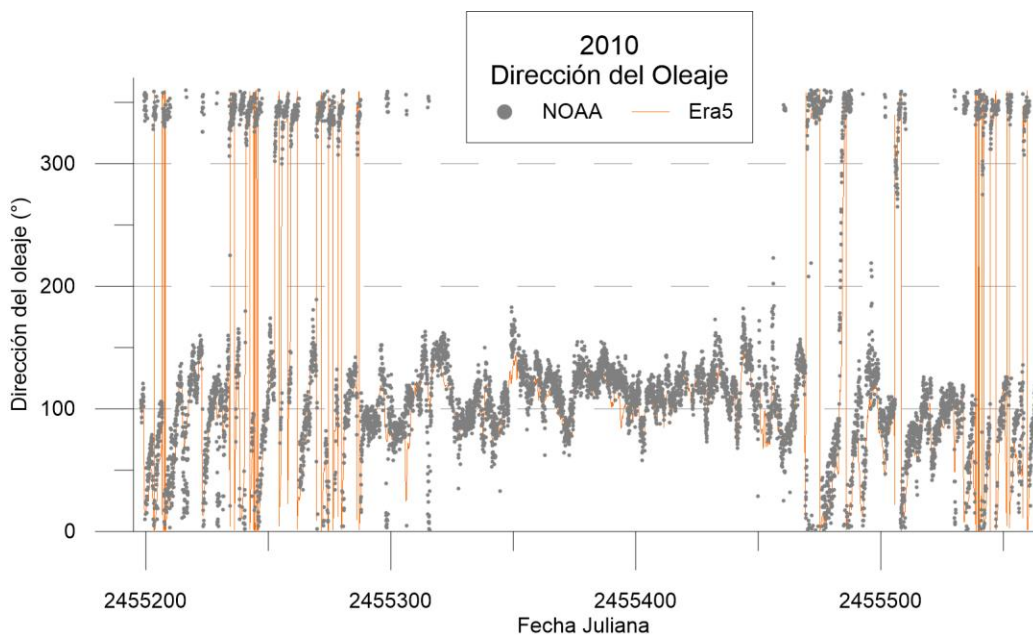


Figura 50. Dirección del oleaje - 2010

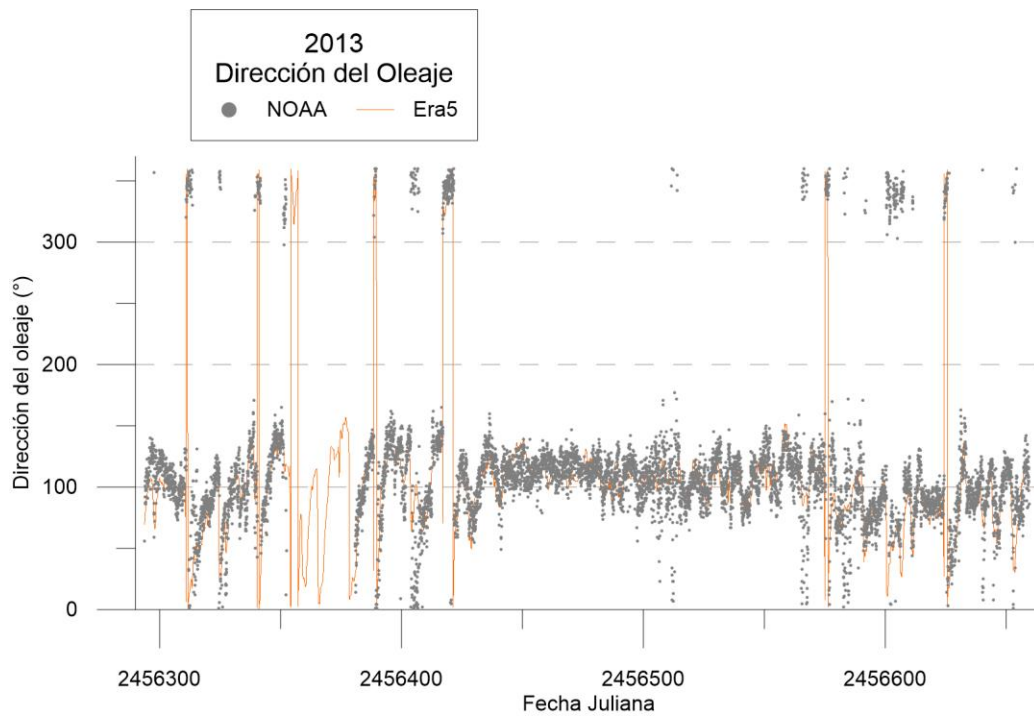


Figura 51. Dirección del oleaje - 2013

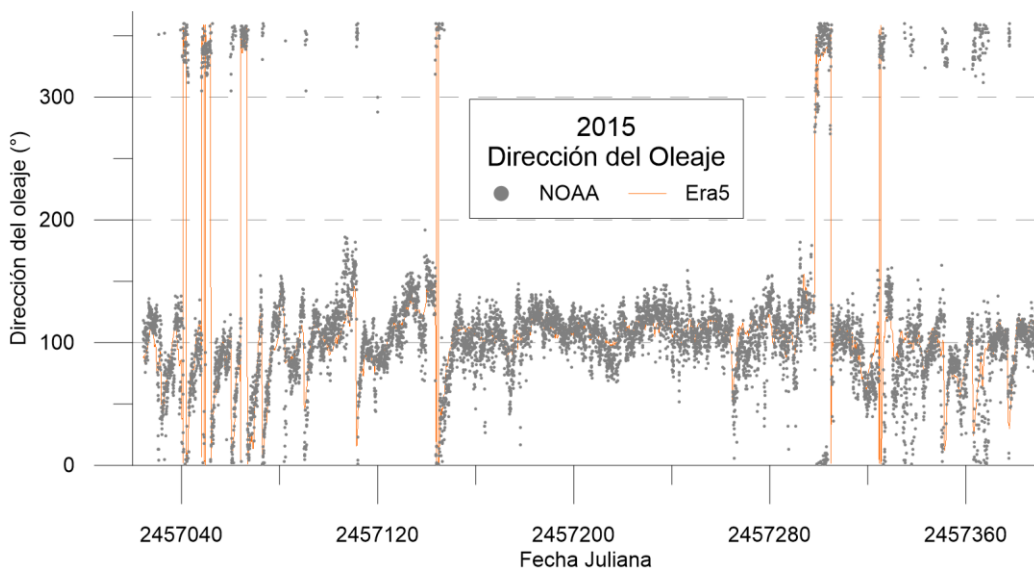


Figura 52. Dirección del oleaje - 2015

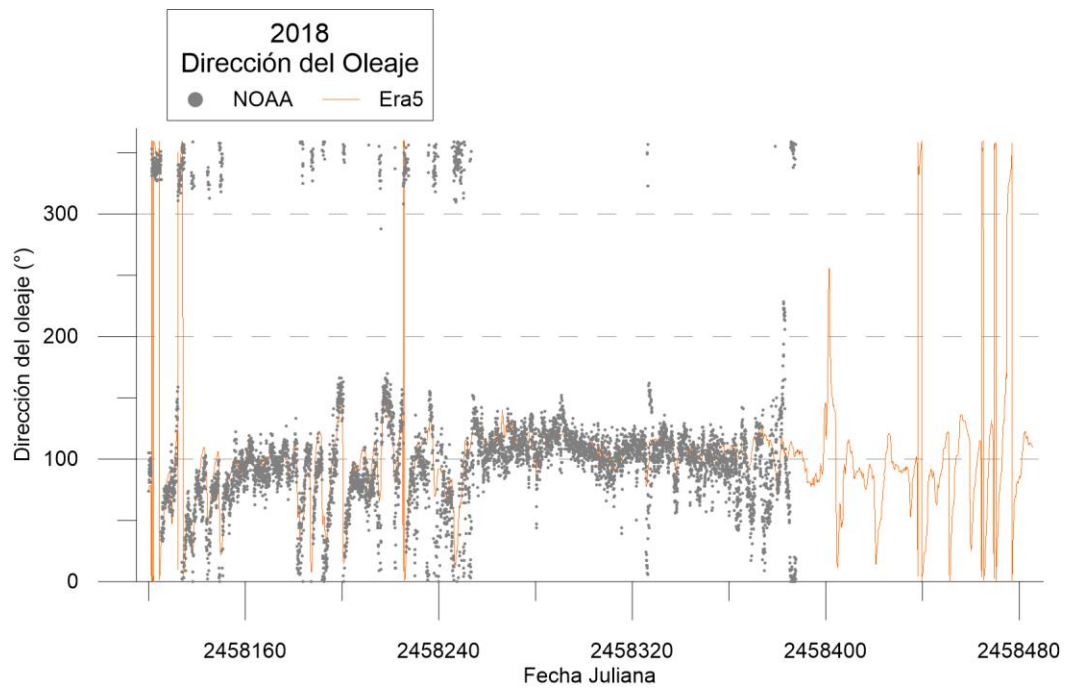


Figura 53. Dirección del oleaje - 2018

Anexo 3: Lista de tablas y figuras

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1. (A) SARGASSUM FLUITANS HTTPS://WWW.NATURALISTA.MX/TAXA/134103-SARGASSUM-FLUITANS ; (B) SARGASSUM NATANS HTTPS://PANAMA.INATURALIST.ORG/TAXA/134104-SARGASSUM-NATANS | 1 |
| FIGURA 2. DENSIDAD DE SARAZO DURANTE EL MES DE JULIO DE LOS AÑOS 2013 – 2018. LOS COLORES CÁLIDOS REPRESENTAN MAYOR DENSIDAD Y LOS COLORES FRÍOS MENOR DENSIDAD DE SARGAZO (WANG ET AL., 2019), (CONACYT, 2019) | 2 |
| FIGURA 3. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PERFIL DE LA COSTA DEL CARIBE MEXICANO Y LOS IMPACTOS DE LA AFLUENCIA DE SARGAZO (CHÁVEZ ET AL., 2020)..... | 5 |
| FIGURA 4. MECANISMOS NATURALES DE REMOCIÓN DE LA BERMA DE ALGAS. MODIFICADA DE (RUTTEN ET AL., 2021) | 16 |
| FIGURA 5. (A) ALERTA SATELITAL DE PRESENCIA DE SARGAZO EN EL GOLFO DE MÉXICO Y EL MAR CARIBE, (B) ÍNDICE ALTERNATIVO DE ALGAS FLOTANTES DIARIO, (C) ÍNDICE ALTERNATIVO DE ALGAS FLOTANTES DIARIO – CHETUMAL, (D) VIENTOS SUPERFICIALES (CERDEIRA-ESTRADA ET AL., 2018-2021)..... | 19 |
| FIGURA 6. REPORTE SEMANAL DE LA INUNDACIÓN DE SARGAZO (TRINANES & GONI, 2019-2022)..... | 20 |
| FIGURA 7. PUERTO MORELOS - FARO INCLINADO (CATAÑEDA, SEPTIEMBRE, 2019). | 21 |
| FIGURA 8. CARIBE MEXICANO - PUERTO MORELOS..... | 22 |
| FIGURA 9. ACUMULACIÓN Y DESCOMPOSICIÓN DEL SARGAZO EN LA PLAYA DE PUERTO MORELOS. A) OCTUBRE 2014, B) AGOSTO 2015, C) JULIO 2017, D) AGOSTO 2018, E) OCTUBRE 2019 Y F) JULIO 2020. TOMADA DE (CHÁVEZ ET AL., 2020). | 24 |
| FIGURA 10. SARGAZO EN PUERTO MORELOS. A) Y B) SARGAZO EN EL MES DE MAYO, 2021, C) Y D) PASTO MARINO EN EL MES DE ENERO 2021. FOTOS TOMADAS POR AMADOR HERNÁNDEZ GÓMEZ, (RUTTEN ET AL., 2021). | 24 |
| FIGURA 11. TRAZO DE BATIMETRÍA, PUERTO MORELOS – ACERCAMIENTO | 26 |
| FIGURA 12. CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA..... | 27 |
| FIGURA 13. DIRECCIÓN DEL VIENTO - 2015..... | 28 |
| FIGURA 14. VELOCIDAD DEL VIENTO – 2010 | 29 |
| FIGURA 15. PERIODO PICO - 2013 | 29 |
| FIGURA 16. ABRIL 2017. DATOS OBTENIDOS DEL REANÁLISIS CLIMÁTICO ERA5 | 31 |
| FIGURA 17. SEPTIEMBRE 2018..... | 31 |
| FIGURA 18. DICIEMBRE 2018..... | 32 |
| FIGURA 19. ENERO 2019 | 32 |
| FIGURA 20. ABRIL 2019..... | 32 |
| FIGURA 21. JULIO 2020 | 33 |
| FIGURA 22. GRÁFICAS DE PROBABILIDAD CONJUNTA DE DIRECCIÓN DEL OLEAJE (°) CONTRA ALTURA DE OLA (M). A) ABRIL 2017, B) SEPTIEMBRE 2018, C) DICIEMBRE 2018, D) ENERO 2019, E) ABRIL 2019 Y F) JULIO 2020..... | 35 |
| FIGURA 23. GRÁFICAS DE PROBABILIDAD CONJUNTA DE PERIODO (s) CONTRA ALTURA DE OLA (M). A) ABRIL 2017, B) SEPTIEMBRE 2018, C) DICIEMBRE 2018, D) ENERO 2019, E) ABRIL 2019 Y F) JULIO 2020. | 36 |
| FIGURA 24. TRAZO DE BATIMETRÍA - PUERTO MORELOS | 38 |
| FIGURA 25. GRD CON ELEVACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO | 39 |
| FIGURA 26. GRÁFICAS DE CONTORNO OBTENIDAS DE LAS CORRIDAS DEL SOFTWARE "WAPO". A) ABRIL 2017, B) SEPTIEMBRE 2018, C) DICIEMBRE 2018, D) ENERO 2019, E) ABRIL 2019 Y F) JULIO 2020. | 40 |
| FIGURA 27. COMPARACIÓN ENTRE ESPECIES DE SARGAZO. (SCHELL ET AL., 2015) | 47 |
| FIGURA 28. PANEL DEL MAPA: PROPORCIÓN DE CADA FORMA DE SARGAZO (S. FLUITANS, S. NATANS I PARR Y S. NATANS VIII PARR), MODIFICADA DE: (SCHELL ET AL., 2015)..... | 47 |
| FIGURA 29. DIRECCIÓN DEL VIENTO - 2005..... | 54 |
| FIGURA 30. DIRECCIÓN DEL VIENTO - 2010..... | 55 |
| FIGURA 31. DIRECCIÓN DEL VIENTO - 2013..... | 55 |
| FIGURA 32. DIRECCIÓN DEL VIENTO - 2015..... | 56 |
| FIGURA 33. DIRECCIÓN DEL VIENTO – 2018..... | 57 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 34. VELOCIDAD DEL VIENTO - 2005 | 57 |
| FIGURA 35. VELOCIDAD DEL VIENTO - 2010 | 58 |
| FIGURA 36. VELOCIDAD DEL VIENTO - 2013 | 58 |
| FIGURA 37. VELOCIDAD DEL VIENTO - 2015 | 59 |
| FIGURA 38. VELOCIDAD DEL VIENTO - 2018 | 59 |
| FIGURA 39. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - 2005 | 60 |
| FIGURA 40. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - 2010 | 60 |
| FIGURA 41. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - 2013 | 61 |
| FIGURA 42. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - 2015 | 61 |
| FIGURA 43. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - 2018 | 62 |
| FIGURA 44. PERIODO PICO - 2005 | 62 |
| FIGURA 45. PERIODO PICO - 2010 | 63 |
| FIGURA 46. PERIODO PICO - 2013 | 63 |
| FIGURA 47. PERIODO PICO - 2015 | 64 |
| FIGURA 48. PERIODO PICO - 2018 | 64 |
| FIGURA 49. DIRECCIÓN DEL OLEAJE - 2005 | 65 |
| FIGURA 50. DIRECCIÓN DEL OLEAJE - 2010 | 65 |
| FIGURA 51. DIRECCIÓN DEL OLEAJE - 2013 | 66 |
| FIGURA 52. DIRECCIÓN DEL OLEAJE - 2015 | 66 |
| FIGURA 53. DIRECCIÓN DEL OLEAJE - 2018 | 67 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1. COBERTURA DE SARGAZO - FECHAS | 30 |
| TABLA 2. CASOS SELECCIONADOS PARA EL MODELO | 39 |
| TABLA 3. VALOR MEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE PH, NH ₄ Y FOSFATO EN TRES ZONAS (10, 20 Y 100 M DESPUÉS DE LA PLAYA) DE LAS TRES LAGUNAS DE ARRECIFE. MODIFICADA DE (RODRÍGUEZ-MUÑOZ ET AL., 2021) | 53 |
| TABLA 4. VALOR MEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE OXÍGENO DISUELTOS Y SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS EN DOS ZONAS (5 Y 15 M DE LA COSTA) DE LAS TRES LAGUNAS DE ARRECIFE. MODIFICADA DE (RODRÍGUEZ-MUÑOZ ET AL., 2021) | 53 |