



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

Dinámica del transporte de sargazo pelágico en el Caribe mexicano

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

(OCEANOGRAFÍA FÍSICA)

PRESENTA:

JULIO ANTONIO LARA HERNÁNDEZ

TUTORES PRINCIPALES:

Dra. Cecilia Enríquez Ortiz
ENES, Mérida, UNAM.
Facultad de Ciencias, UMDI Sisal, UNAM.

Dr. Jorge Zavala Hidalgo
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio
Climático, CU, UNAM.

COMITÉ TUTOR:

Dra. Brigitta van Tussenbroek
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UASA,
Puerto Morelos, UNAM.

Dr. Eduardo Cuevas Flores
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CINVESTAV, Mérida, IPN.

Dr. Edgar Mendoza Baldwin
Instituto de Ingeniería, CU, UNAM.

MÉXICO, CDMX, SEPTIEMBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Dinámica del transporte de sargazo pelágico en el Caribe mexicano

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

(OCEANOGRAFÍA FÍSICA)

PRESENTA:

JULIO ANTONIO LARA HERNÁNDEZ

TUTORES PRINCIPALES:

Dra. Cecilia Enríquez Ortiz
ENES, Mérida, UNAM.
Facultad de Ciencias, UMDI Sisal, UNAM.

Dr. Jorge Zavala Hidalgo
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio
Climático, CU, UNAM.

COMITÉ TUTOR:

Dra. Brigitta van Tussenbroek
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
UASA, Puerto Morelos, UNAM.

Dr. Eduardo Cuevas Flores
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CINVESTAV, Mérida, IPN.

Dr. Edgar Mendoza Baldwin
Instituto de Ingeniería, CU, UNAM.

MÉXICO, CDMX, SEPTIEMBRE, 2023

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, por articular el programa curricular y las actividades académicas y administrativas que permitieron mi formación y consolidación como doctor en ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por financiar este proyecto mediante una beca nacional de doctorado [CVU-563323].

Al Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT), UNAM, y al Centro Ecológico de Akumal (CEA), por financiar mi estancia de investigación.

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC), UNAM, por proporcionarme una beca de Apoyo para Titulación y Obtención de Grado mediante un Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios.

Agradecimientos especiales a mis tutores principales, la Dra. Cecilia Enríquez Ortiz y el Dr. Jorge Zavala Hidalgo, por guiarme y apoyarme a lo largo de todo mi doctorado; ha sido un gran gusto poder aprender de ustedes.

A los integrantes de mi Jurado de Examen de Grado, la Dra. Brigitta van Tussenbroek, el Dr. Eduardo Cuevas Flores y el Dr. Edgar Mendoza Baldwin, cuyos aportes enriquecieron no sólo esta investigación sino también mi formación como científico.

A la Dra. Abigail Uribe Martínez, por su colaboración con una parte importante del proyecto, especialmente con la detección satelital de sargazo.

Al Dr. Steven Czitrom Baus, al M. en C. Iván Penié Rodríguez, al Dr. Ismael Mariño Tapia, al M. en I. Miguel Gómez Reali, al M. en C. Edgar Escalante Mancera, al Dr. Rodrigo Garza Pérez y al Lic. Marco Montes Sainz. Su colaboración fue muy valiosa para realizar con éxito el trabajo de campo en Akumal y Puerto Morelos, Quintana Roo, México.

A todos los investigadores que colaboran con el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) para atender la problemática del arribo masivo de sargazo en el Caribe mexicano; las reuniones de trabajo con ustedes fueron muy enriquecedoras.

Dedicatoria

Dedico este esfuerzo con mucho cariño a mi familia, especialmente a mis padres Adriana y Julio, quienes siempre me han apoyado en lo personal, económico y en todo aspecto. Gracias por su indispensable ayuda para hacer posible no sólo esta investigación sino también mi formación como persona y científico.

Artículos

Lara-Hernández JA, Enríquez C, Zavala-Hidalgo J, et al. (2024) *Sargassum* Transport Towards Mexican Caribbean Shores: Numerical Modeling for Research and Forecasting. *J Mar Sys* 241, 103923, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103923>.

Conferencias

Lara-Hernández JA, Enríquez C, Zavala-Hidalgo J, et al. (2022) Transporte y arribazón potencial de sargazo holopelágico en el Caribe mexicano: análisis de sensibilidad a diferentes configuraciones de un modelo numérico. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana (RAUGM), Puerto Vallarta, Jalisco, México, del 30 de octubre al 4 de noviembre de 2022.

Lara-Hernández JA, Enríquez C, Zavala-Hidalgo J, et al. (2021) Transport dynamics of pelagic *Sargassum* in the Mexican Caribbean: sensitivity studies to the wind and depth of the transporting ocean layer. EGU General Assembly, EGU21-3688, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3688>

Lara-Hernández JA, Enríquez C, Zavala-Hidalgo J, et al. (2021) Dinámica del transporte del sargazo pelágico en las cercanías del Caribe mexicano: análisis de sensibilidad. Recursos CONACyT (<https://energia.conacyt.mx/sargazo/recursos>), Seminario-Taller Nacional sobre teledetección, monitoreo, pronóstico y alerta temprana del sargazo pelágico que arriba a las costas mexicanas: descubriendo sinergias y construyendo puentes hacia un sistema integral y regional. Del 1 al 2 de julio del 2021, modalidad en línea, Ciudad de México, México. Presentación disponible en: https://cdn.conacyt.mx/enis/energia/sargazo/acciones/3_Comunicacion-y-Educacion_Presentacion-8-Dinamica-de-transporte-de-sargazo-pelagico-en-las-cercanias-del-Caribe-Mexicano-analisis-de-sensibilidad.pdf

Proyectos

Participación en el proyecto multi-institucional y multidisciplinario del año 2022 “*Sistema de Observación y Alerta Temprana del Sargazo*”, en el marco del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM) y financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Índice

Resumen	10
Abstract	12
1° capítulo – Introducción general.....	14
1.1. Justificación	18
1.2. Preguntas de investigación	19
1.3. Objetivos.....	20
2° capítulo – Área de estudio: Caribe mexicano.....	21
2.1. Geografía e hidrogeología	22
2.2. Vientos.....	23
2.3. Circulación oceánica.....	25
2.4. Lagunas arrecifales	28
3° capítulo – Marco teórico: panorama en torno al problema de sargazo a gran escala	31
3.1. ¿Qué es el sargazo pelágico?	31
3.2. Características biológicas relevantes	34
3.2.1. Reproducción	34
3.2.2. Crecimiento.....	34
3.2.3. Adquisición eficiente de recursos	39
3.2.4. Plasticidad fenotípica	39
3.2.5. Tolerancia fisiológica amplia.....	40
3.2.6. Falta de depredadores	41
3.2.7. Alta capacidad de dispersión.....	42
3.3. ¿Qué es lo bueno y lo malo respecto al sargazo?	42
3.4. ¿Cómo y por dónde se desplaza?.....	43
3.5. ¿Qué pasa en la zona costera?	45
3.6. ¿Qué nutrientes y contaminantes lo afectan?	47
3.7. ¿Qué variables ambientales lo afectan?.....	50
3.8. ¿Por qué ha proliferado masivamente?.....	51
3.9. ¿Cómo predecir los arribos masivos?.....	52
3.10. ¿Cómo mitigar los arribos masivos?	53
4° capítulo – Sistema Lagrangiano y fuentes de datos.....	55

4.1. Introducción.....	55
4.2. Métodos	59
4.2.1. Sistema Lagrangiano.....	59
4.2.2. Datos de detección satelital de sargazo.....	61
4.2.3. Datos de clorofila.....	62
4.2.4. Datos de vientos y corrientes	63
4.3. Resultados.....	66
4.3.1. Sistema Lagrangiano.....	66
4.3.2. Validación de vientos y corrientes	73
4.4. Discusión	77
4.4.1. Posición inicial de las partículas virtuales	78
4.4.2. Tiempo máximo de seguimiento de las partículas virtuales	79
4.4.3. Métodos de interpolación.....	79
4.4.4. Paso de tiempo y método Runge-Kutta	80
4.4.5. Modelo de crecimiento.....	81
4.4.6. Validación de vientos y corrientes	83
4.5. Conclusión	84
5° capítulo – Análisis de sensibilidad: cambio en el porcentaje de arribo debido a cambios en parámetros del modelo.....	86
5.1. Introducción.....	86
5.2. Métodos	89
5.3. Resultados.....	92
5.3.1. Factor de viento.....	95
5.3.2. Distribución horizontal inicial de las partículas virtuales.....	96
5.3.3. Variabilidad mensual de los vientos y corrientes marinas.....	97
5.3.4. Crecimiento de sargazo.....	98
5.3.5. Espesor de la capa superficial que transporta sargazo	99
5.3.6. Fuente de datos de viento.....	100
5.3.7. Fuente de datos de corrientes marinas	100
5.4. Discusión	101
5.4.1. Factor de viento.....	101

5.4.2. Distribución horizontal inicial de las partículas virtuales	102
5.4.3. Variabilidad mensual de vientos y corrientes marinas.....	104
5.4.4. Crecimiento de sargazo	105
5.4.5. Espesor de la capa superficial que transporta sargazo	108
5.4.6. Fuente de datos de viento.....	110
5.4.7. Fuente de datos de corrientes marinas	110
5.5. Conclusiones.....	110
6° capítulo – Análisis mensual de la dinámica del sargazo en el Caribe mexicano.....	112
6.1. Introducción.....	112
6.2. Métodos	114
6.3. Resultados.....	116
6.3.1. Potencial de arribo a lo largo del Caribe mexicano	116
6.3.2. Probabilidades de arribo del sargazo localizado en mar abierto	118
6.3.3. Tiempos probables de viaje del sargazo que arribará en el Caribe mexicano	120
6.3.4. Regiones probables de arribo del sargazo localizado en mar abierto	120
6.3.5. Conos de incertidumbre de trayectorias.....	121
6.3.6. Rutas de dispersión del sargazo que arribó al Caribe mexicano.....	124
6.3.7. Diferencias entre el flujo de la corriente y el del sargazo debidas al viento.....	126
6.4. Discusión	128
6.4.1. Potencial de arribo a lo largo del Caribe mexicano	128
6.4.2. Probabilidades de arribo del sargazo localizado en mar abierto	132
6.4.3. Tiempos probables de viaje del sargazo que arribará al Caribe mexicano	133
6.4.4. Regiones probables de arribo del sargazo localizado en mar abierto	134
6.4.5. Conos de incertidumbre de trayectorias.....	135
6.4.6. Rutas de dispersión del sargazo que arribó al Caribe mexicano.....	137
6.4.7. Diferencias entre el flujo de la corriente y el del sargazo debidas al viento.....	137
6.5. Conclusión	138
7° capítulo – Estimación del destino del sargazo detectado en momentos específicos	141
7.1. Introducción.....	141
7.2. Métodos	144
7.2.1. Estimaciones de transporte y arribo.....	144

7.2.2. Comparación de estimaciones del modelo con observaciones	145
7.3. Resultados.....	148
7.3.1. Estimaciones para sargazo detectado el 14-ago-2018.....	148
7.3.2. Estimaciones para sargazo detectado el 15-sep-2018	149
7.3.3. Estimaciones para sargazo detectado el 05-ene-2019	149
7.3.4. Estimaciones para sargazo detectado el 11-abr-2019	150
7.3.5. Comparación de estimaciones del modelo con observaciones	152
7.4. Discusión	154
7.4.1. Estimaciones de transporte y arribo	154
7.4.2. Comparación de estimaciones del modelo con observaciones	157
7.4.3. Aspectos para mejorar.....	159
7.5. Conclusión	163
8° capítulo – Conclusiones generales	164
Apéndice a	172
Apéndice b	179
Referencias	186

Resumen

Desde el año 2011, el sargazo pelágico (*Sargassum fluitans* y *S. natans*) ha proliferado atípicamente y masivamente en el Atlántico nortropical, induciendo arribos masivos que causan graves y diversos daños (e.g., ecológicos, económicos, sociales) en sistemas costeros del este de América y del oeste de África. El Caribe mexicano es una región de inmenso valor ecológico y turístico que desde el año 2014 se ha visto seriamente afectada por los arribos de sargazo. Lo anterior demanda con urgencia entender y caracterizar el desplazamiento de sargazo en la superficie marina de la región, así como generar sistemas de pronóstico de arribo que sean confiables y oportunos. En este trabajo se desarrolló e implementó un modelo eficiente de seguimiento de partículas virtuales para estimar y analizar el transporte y arribo de sargazo en el Caribe mexicano. Se realizaron análisis de sensibilidad para cuantificar el cambio en los porcentajes de arribo variando algunos factores del modelo: 1) factor de viento, 2) la distribución espacial del sargazo en superficie, 3) la variabilidad mensual de las corrientes y los vientos, 4) el crecimiento del sargazo, 5) el espesor de la capa oceánica que transporta sargazo, 6) fuentes de datos de viento y 7) fuentes de datos oceánicos. De los anteriores, el factor de viento tuvo el mayor efecto en las estimaciones de arribo: al aumentar el factor de viento de 0% a 3%, el porcentaje de arribo de sargazo se incrementó en un ~30%. En segundo lugar, las diferencias en la distribución espacial inicial del sargazo hicieron que el porcentaje de arribo cambie en ~10%. En tercer lugar, la variabilidad mensual de corrientes y vientos modificó el porcentaje de arribo en un 6%. La costa norte del Caribe mexicano (entre 20.25°N y 20.75°N) fue la más propensa a los arribos de sargazo. A escala regional, esta condición está relacionada con a) la orientación de la línea de costa en esa región, que presenta una mayor oposición al flujo hacia el norte de la Corriente de Yucatán, y b) la presencia de la isla de Cozumel, cuyo flanco oriental actúa como una barrera que retiene sargazo. La mayor parte del sargazo que

arribó al Caribe mexicano pasó flotando entre 0 y 40 km al este de Banco Chinchorro, entre 18.25°N y 18.75°N (región sur del Caribe mexicano), y posteriormente se distribuyó a lo largo de la costa. La información generada en este trabajo contribuye a la definición de estrategias regionales de atención a la problemática de los arribazones de sargazo, con lo que se pueden planificar acciones más efectivas, eficientes y económicas para mitigar los impactos negativos relacionados con el arribo masivo de sargazo en esta región. Por ejemplo, se sugiere que el monitoreo, contención y recolección de sargazo al este y sur de Banco Chinchorro puede ayudar a predecir y mitigar los arribos de sargazo con aproximadamente 5 días de anticipación.

Palabras clave

Alga pelágica; modelo Lagrangiano; Caribe occidental; HYCOM; ERA5; CFSv2

Abstract

Since 2011, pelagic sargassum (*Sargassum fluitans* and *S. natans*) has atypically and massively proliferated in the tropical north Atlantic, inducing massive landings that cause serious and diverse damages (e.g., ecological, economic, social) to the coastal systems of eastern Americas and west Africa. the Mexican Caribbean is a region of immense ecological and touristic value that has been seriously affected by sargassum landings since 2014. This demands an urgent understanding and characterization of sargassum displacement on the sea surface of the region, as well as the generation of reliable and timely landing forecasting systems. in this work, an efficient particle-tracking model was developed and implemented to estimate and analyze the transport and landing of sargassum in the Mexican Caribbean. Sensitivity analyses were performed to quantify the change in landing percentages by varying some model factors: 1) windage factor, 2) spatial distribution of sargassum on the sea surface, 3) monthly variability of currents and winds, 4) sargassum growth, 5) thickness of the ocean layer that transports sargassum, 6) wind data sources, and 7) ocean data sources. of these, the windage factor had the greatest effect on landing estimates: by increasing the windage factor from 0% to 3%, the percentage of sargassum landings increased by ~30%. Secondly, differences in the initial spatial distribution of sargassum caused the landing percentage to change by ~10%. Thirdly, monthly variability of currents and winds changed the landing percentage by 6%. the northern coast of the Mexican Caribbean (between 20.25°N and 20.75°N) was the most prone to sargassum landings. at the regional scale, this condition is related to a) The orientation of the coastline in that region, which presents greater opposition to the northward flow of the Yucatan Current, and b) The presence of Cozumel Island, whose eastern flank acts as a barrier that retains sargassum. Most of the sargassum landed in the Mexican Caribbean floated between 0 and 40 km east of Banco Chinchorro, between 18.25°N and 18.75°N

(southern Mexican Caribbean), and it was subsequently distributed along the coast. the information generated in this work contributes to the definition of regional strategies to address the problem of sargassum landings, with which more effective, efficient, and economic actions can be planned to mitigate the negative impacts related to the massive landings in this region. for example, it is indicated that monitoring, containment, and collection of sargassum east and south of Banco Chinchorro could help predict and mitigate sargassum landings with approximately 5 days of anticipation.

Keywords

Pelagic seaweed; Lagrangian model; Western Caribbean; HYCOM; ERA5; CFSv2

1º capítulo – Introducción general

Dentro del género *Sargassum*, *S. fluitans* y *S. natans* (en lo sucesivo denominadas sargazo) son las únicas dos especies holopelágicas, es decir, que flotan libremente durante todo su ciclo de vida (carecen de rizoide para anclarse al fondo marino) (Kilar et al. 1992; Guiry 2022; Stiger-Pouvreau et al. 2023) (Fig. 1).



Fig. 1. Sargazo pelágico: (a) talo individual, (b) balsa flotando en mar abierto, (c) sargazo arribado y apilado para su recolección. Las fotografías (a) y (c) se tomaron en la playa de la laguna Arrecifal

de Akumal, mientras que la fotografía (b) se tomó en el mar abierto a ~100 m de la barrera arrecifal de dicha laguna. Fotografías tomadas en marzo de 2022.

El sargazo generalmente se distribuía en el Mar de los Sargazos, en el norte del Mar Caribe y en el Golfo de México, formando un "sistema de circuito migratorio de sargazo" en el sentido de las manecillas del reloj (Webster y Linton, 2013; Frazier, 2014; Hill, 2016) (Fig. 2). Sin embargo, a partir de 2011 también se encuentran grandes cantidades de sargazo pelágico en la Región de Recirculación NorEcuatorial (NERR, por sus siglas en inglés) (Franks et al., 2016), las cuales probablemente provinieron del Mar de los Sargazos (Johns et al., 2020), y se ha formado un "Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico" desde África occidental hasta el Golfo de México, el cual es estacionalmente recurrente (Wang et al., 2019).

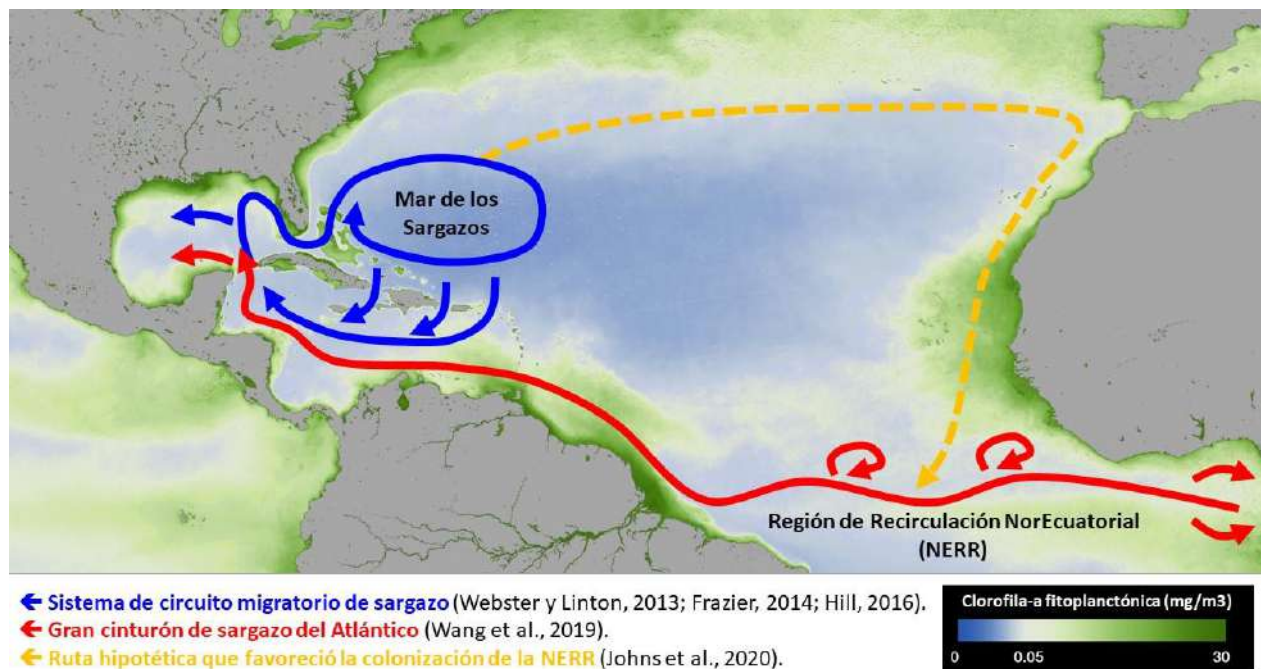


Fig. 2. Esquema de las principales rutas de viaje asociadas al sargazo en el Atlántico Norte. El color de fondo indica el promedio anual de la concentración de clorofila-a para el año 2018, según datos satelitales de ESA-CCI (Sección 4.2.3).

Desde 2011, la biomasa de sargazo ha crecido excesivamente, provocando arribos masivos de sargazo a lo largo de las costas del este de América y el oeste de África (Wang et al., 2019; Jouanno et al., 2021). Las balsas de sargazo en mar abierto brindan servicios ecosistémicos como áreas de refugio, alimentación, descanso y reproducción para numerosas especies de alto interés ecológico y comercial (Rooker et al., 2006; Witherington et al., 2012). Sin embargo, cuando arriba en las playas de forma masiva, causa daños sin precedentes en los ecosistemas costeros, la economía, el turismo y la sociedad (Solarin et al., 2014; Milledge y Harvey, 2016; van Tussenbroek et al., 2017; Rodríguez-Martínez et al., 2019; Chavez et al., 2020; Devault et al., 2021).

Las costas del Caribe mexicano (Fig. 3) son particularmente susceptibles a los arribos de sargazo porque la península de Yucatán constituye una barrera frontal que se opone al transporte hacia el oeste inducido por la Corriente Caimán y los vientos alisios (García-Sánchez et al., 2020; Rodríguez-Martínez et al., 2022; Uribe-Martínez et al., 2022). El Caribe mexicano depende económicamente del turismo, atraído principalmente por la belleza de importantes ecosistemas pertenecientes al Sistema Arrecifal Mesoamericano, como los arrecifes de coral, las praderas de pastos marinos y los manglares (Mata-Lara et al., 2018; Rioja- Nieto et al., 2019; Rioja-Nieto y Alvarez-Filip 2019; Guimaraes et al., 2021). Los arribos masivos periódicos de sargazo han afectado gravemente al Caribe mexicano desde 2014 (Rodríguez-Martínez et al., 2016, 2019, 2022, 2023; van Tussenbroek et al., 2017; Chávez et al., 2020; Fraga y Robledo 2022; Uribe-Martínez et al., 2022).

Un enfoque razonable para estudiar y pronosticar la dinámica relacionada con el transporte del sargazo se basa en la integración de modelos numéricos, monitoreo satelital y observaciones *in situ*. Algunos sistemas de monitoreo satelital de sargazo ya están operando para regiones específicas (e.g., <https://optics.marine.usf.edu>; <http://sargazo.lanot.unam.mx>), generando

información que podría usarse para inicializar y validar modelos numéricos. Sin embargo, aún se necesita un sistema numérico operativo para estudiar y pronosticar el transporte y arribo de sargazo en el Caribe mexicano. Tal sistema requerirá de los resultados de una evaluación minuciosa de distintos parámetros de configuración, con el fin de generar estimaciones suficientemente confiables y rápidas en términos computacionales. Además, dada la relativamente reciente aparición de esta problemática en las costas, está aumentando el número de estudios relacionados con el transporte del sargazo en el Caribe mexicano (e.g., Rutten et al., 2021; Uribe-Martínez et al., 2022), aunque aún queda mucho por entender.

1.1. Justificación

Los arribos masivos de sargazo en el Caribe mexicano han generado problemas sin precedentes en distintos ámbitos, incluido el ambiental, social, económico y de salud. Desarrollar modelos eficientes para estudiar y predecir el transporte de sargazo pelágico es un gran reto y un paso esencial para afrontar la problemática de los arribos masivos. Por ejemplo, se podrían identificar oportunamente los tiempos y regiones del mar abierto en donde resulte conveniente bloquear y/o recolectar sargazo antes de que arribe a las playas; se podrían sugerir regiones clave para el monitoreo; y se podrían identificar las regiones que serán más afectadas y que, por lo tanto, resultan prioritarias en cuanto a esfuerzos de mitigación y manejo. Al reducir la cantidad de sargazo acumulado en playas y cuerpos de agua costeros, disminuirán los efectos nocivos de la descomposición (entre otros), mejorando la salud de los ecosistemas costeros, incluida la salud humana (esencialmente de los pobladores que se encuentran expuestos permanentemente a los efectos nocivos de los arribos masivos), así como la disponibilidad de recursos pesqueros, turísticos y económicos. Además, no menos importante, este estudio contribuye en avanzar el entendimiento de la dinámica del transporte de sargazo en el Caribe noroccidental y de los factores que la afectan.

1.2. Preguntas de investigación

- ¿Cómo se podría mejorar la eficiencia de sistemas Lagrangianos para estimar la dinámica del transporte de sargazo en el Caribe mexicano?
- ¿Cuál es la sensibilidad a distintos factores de modelos Lagrangianos que usan datos libres de vientos y corrientes para estimar la dinámica del transporte de sargazo en el Caribe mexicano?
- ¿Cuál es la dinámica del transporte y arribo de sargazo en el Caribe mexicano durante algunos meses selectos?
- ¿Cuál fue el destino del sargazo en el Caribe mexicano que fue detectado en algunos momentos específicos?
- ¿Cómo se podría optimizar el monitoreo y la recolección de sargazo para reducir el arribo masivo y los daños asociados?

1.3. Objetivos

General

Investigar la dinámica del transporte de sargazo pelágico en el Caribe mexicano, mediante modelación numérica y observaciones, para ayudar al desarrollo de medidas de prevención, mitigación y manejo de arribos masivos.

Específicos

- Desarrollar un sistema Lagrangiano eficiente para estimar la dinámica del transporte de sargazo en el Caribe mexicano.
- Analizar la sensibilidad de modelos Lagrangianos usando datos libres de vientos y corrientes marinas, para estimar la dinámica del transporte de sargazo en el Caribe mexicano.
- Entender aspectos de la dinámica a escala mensual de transporte y potencial de arribo de sargazo en el Caribe mexicano.
- Estimar el destino del sargazo en el Caribe mexicano que fue detectado en momentos específicos.
- Proporcionar información para optimizar el monitoreo y la recolección de sargazo, reduciendo así al arribo masivo de sargazo y el daño ambiental y socioeconómico asociado.

2° capítulo – Área de estudio: Caribe mexicano

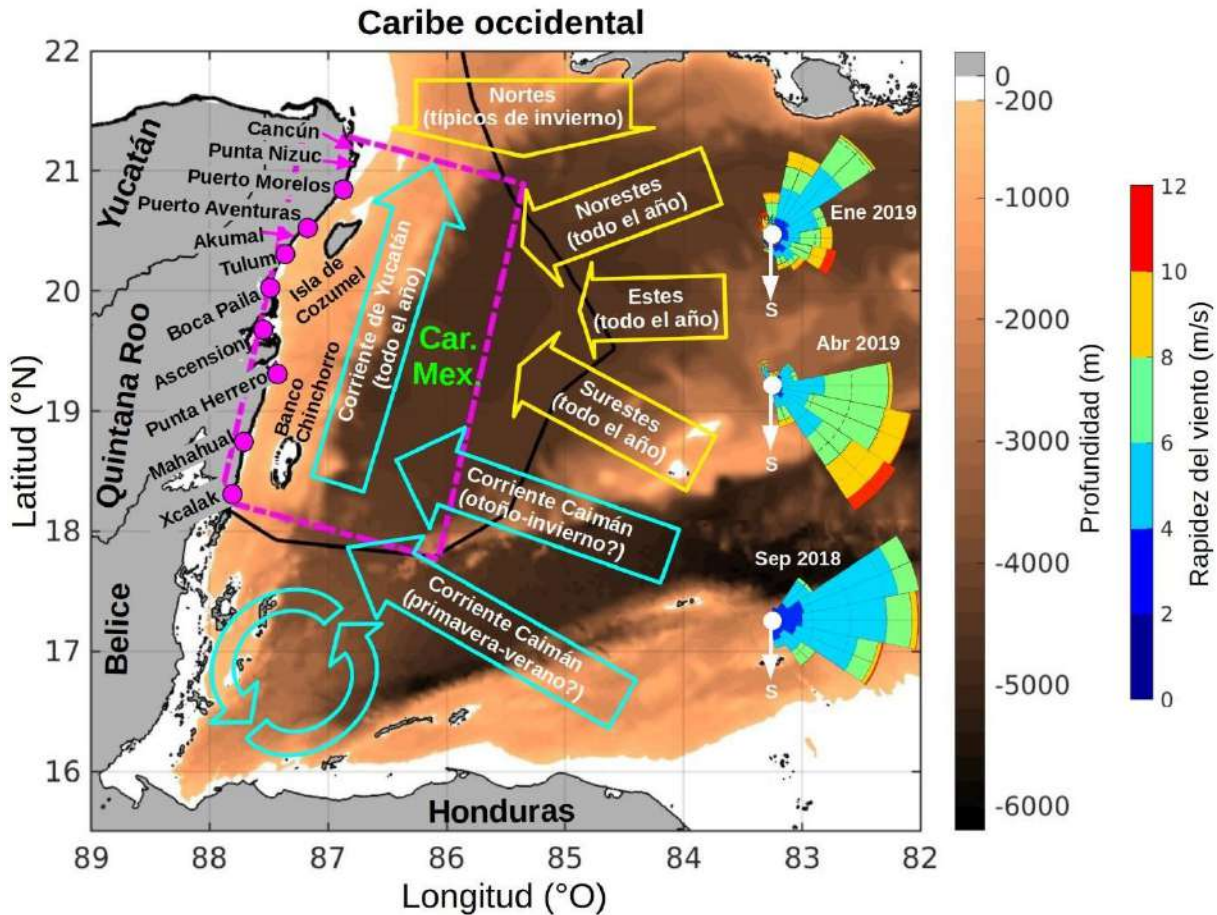


Fig. 3. Área de estudio, el Caribe mexicano (Mex. Car., línea negra gruesa), como parte del Caribe occidental. Las flechas color cian indican las corrientes principales y su estacionalidad. Las flechas amarillas indican los vientos principales y su estacionalidad. Entre Ascension y la Isla de Cozumel se suele generar un remolino ciclónico (Carrillo et al., 2015). Las rosas de los vientos se construyeron con mediciones de viento en Puerto Morelos durante septiembre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019. La línea discontinua magenta delimita la región donde se sembraron partículas virtuales, la cual coincide con las dos escenas principales de Landsat-8 en el Caribe mexicano. La plataforma continental se indica en color blanco.

2.1. Geografía e hidrogeología

El Caribe mexicano es parte del Caribe occidental, y se encuentra comprendido aproximadamente entre 17.5-21.5°N y 84.5-88°O (Fig. 3). Se extiende desde la costa caribeña de la Península de Yucatán hasta ~250 km mar adentro, con su área más profunda (~5 km de profundidad) alrededor de 20°N, 86°O, a más de ~100 km de la línea de costa. En general, la línea de costa tiene una orientación SSO-NNE, formando un ángulo de ~50° con respecto a un paralelo geográfico (es decir, con respecto a la orientación zonal, y girando en contra de las manecillas del reloj). Sin embargo, hay excepciones regionales: entre Xcalak y Punta Herrero el ángulo es de ~70°; entre Punta Herrero y Boca Paila, la orientación es a grandes rasgos S-N, con un ángulo de 90°; entre Boca Paila y Puerto Morelos, el ángulo es de ~50°; y al norte de Puerto Morelos el ángulo aumenta gradualmente, hasta llegar a ~120° en el extremo norte del Caribe mexicano. Cuanto menor sea el ángulo de la línea de costa, mayor será la oposición del continente a las corrientes marinas que fluyen hacia el norte. La plataforma continental (zona nerítica) en el Caribe mexicano es muy estrecha, generalmente de 2 a 5 km de ancho, pero al norte de Puerto Morelos se ensancha gradualmente hasta ~50 km (a ~21.6°N).

La península de Yucatán está compuesta principalmente de piedra caliza que alberga un gran acuífero kársticos (Bauer-Gottwein et al., 2011). Por lo tanto, la mayor parte de la descarga de agua continental al Caribe mexicano ocurre directamente desde el suelo (e.g., a través de manantiales submarinos, fracturas, o de forma difusa atravesando la capa sedimentaria), lo cual influye en la dinámica costera (Bauer-Gottwein et al., 2011; Carrillo et al., 2016; Parra et al., 2014, 2015, 2016; Estrada-Medina et al., 2019). Dicha descarga de agua también afecta al Agua Superficial del Caribe, esencialmente en las regiones más cercanas a las costas del Caribe mexicano (Carrillo et al., 2016). La señal de la descarga de agua continental en la región se ha llegado a

observar como una delgada capa superficial menos salina que llega hasta ~20 km hacia mar abierto en algunas zonas de la costa, esencialmente en la parte sur del Caribe mexicano (Carrillo et al., 2016). Sin embargo, dicha señal fluctúa dependiendo de la ocurrencia de lluvias, las cuales predominan de junio a octubre (Carrillo et al., 2009). Las aguas continentales además acarrean nutrientes de origen antropogénico y otros contaminantes, lo cual ha contribuido con la eutrofización y el deterioro ambiental de ecosistemas costeros en el Caribe mexicano, particularmente en su porción norte (entre Tulum y Cancún), la cual presenta un mayor grado de antropización (Pérez-Gómez et al., 2020; Guimaraes et al., 2021). No obstante, el estado trófico de cuerpos de agua neríticos a lo largo del área de estudio se reporta muy variable, desde oligotrófico hasta eutrófico (Guimaraes et al., 2021). Pasando la zona nerítica, las aguas del Caribe mexicano se vuelven rápidamente más oligotróficas y presentan una productividad primaria muy baja (Condal et al., 2013).

2.2. Vientos

La circulación atmosférica de amplia escala en el Caribe mexicano y áreas adyacentes está dominada por los vientos alisios, los cuales presentan velocidades típicas de 4 a 8 m/s (Fig. 3, Fig. 4) y una dirección predominante del este, con modulaciones del sureste y noreste (Chadee y Clarke 2015). Los vientos alisios se debilitan cuando se intensifica la actividad de huracanes (usualmente de septiembre a noviembre) (Amador 2008; Miret-Villaseñor et al., 2019) y de vientos del norte que son típicamente inducidos por frentes fríos de corta duración (~3 días), durante invierno y principios de primavera (Ortiz-Royero et al., 2013; Allende-Arandía et al., 2020). No obstante, en la escala mensual predominan los vientos alisios, incluso durante los meses con nortes (e.g., enero de 2019) (Fig. 3; Fig. 4). Durante los meses de estudio también se observa una mayor variabilidad en los vientos de invierno (i.e., enero de 2019), ya que ocurrieron tanto nortes como vientos alisios

del noreste, este y sureste (Fig. 3). El promedio mensual de los vientos durante dicho mes de invierno también evidencia un debilitamiento en la rapidez ($<4\text{m/s}$) de los vientos alisos en el Caribe mexicano, así como un predominio de los vientos alisos del noreste (Fig. 4). El promedio mensual de los demás meses estudiados (agosto y septiembre de 2018, y abril de 2019) muestra vientos mayormente del este, los cuales por lo general superan los 5 m/s y se intensifican gradualmente hacia el sur del Caribe mexicano (Fig. 4).

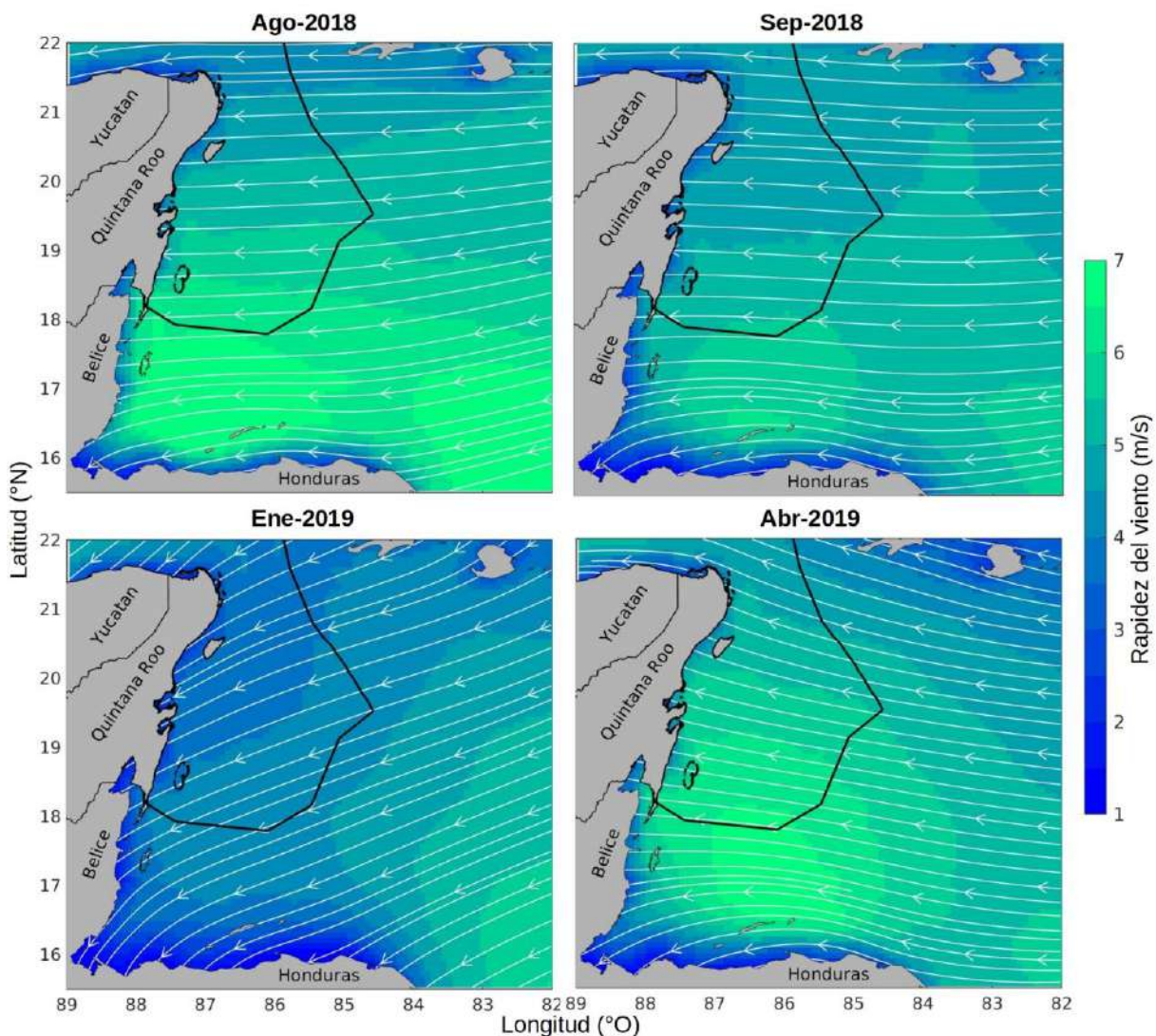


Fig. 4. Promedio mensual de los campos de viento a 10 m sobre la superficie marina del Caribe occidental, durante meses selectos. Los datos de viento provienen del reanálisis de ERA5.

A una escala menor y más costera, el ciclo diurno de brisas marinas-terrestres, vientos que cruzan la costa debido a las diferencias de temperatura entre el mar y la tierra, se observa ocasionalmente en el Caribe mexicano, particularmente cuando los vientos alisios, vientos del norte y huracanes están debilitados o ausentes. Las brisas marinas, vientos típicos del día que van de la región marina (relativamente fría) hacia la región terrestre (relativamente cálida), fluyen de este a oeste en el Caribe mexicano debido a la orientación de la línea de costa, razón por la cual se enmascaran y suman con los vientos alisios, generando una intensificación de vientos del este en la franja costera. En contraste, las brisas terrestres, vientos típicos de la noche que van de la región terrestre (relativamente fría) hacia la región marina (relativamente cálida), fluirían de oeste a este en el Caribe mexicano, pero suelen ser inhibidas por los vientos alisios que soplan en sentido contrario (Allende-Arandía et al., 2020; Cahuich-López et al., 2020).

2.3. Circulación oceánica

La circulación oceánica a gran escala en el Caribe mexicano está dominada por dos secciones de la Corriente del Caribe: la Corriente Caimán y la Corriente de Yucatán (Fig. 3, Fig. 5). La Corriente del Caribe ingresa al Caribe mexicano como la Corriente Caimán, un flujo al norte de Honduras que se dirige hacia el oeste. La Corriente Caimán eventualmente llega a la península de Yucatán, gira hacia el norte y se convierte en la Corriente de Yucatán (Centurioni y Niiler, 2003). Cuando se producen fuertes remolinos ciclónicos frente a Belice, la Corriente Caimán fluye más al norte, por ejemplo, al norte del Banco Chinchorro, lo que está asociado a un flujo hacia el sur a través del canal de Chinchorro. Si los remolinos ciclónicos se debilitan, la Corriente Caimán fluye más al sur, por ejemplo, al sur del Banco Chinchorro, lo que provoca un flujo hacia el norte a través del canal de Chinchorro (Ezer et al., 2005; Carrillo et al., 2015). La Corriente de Yucatán fluye hacia el norte como una corriente de frontera oeste, que se intensifica gradualmente hasta alcanzar velocidades

cercanas a los 2 m/s, al norte de $\sim 20.5^{\circ}\text{N}$ (Sheinbaum et al., 2002; Cetina et al., 2006). Eventualmente, la Corriente de Yucatán cruza el Canal de Yucatán y se le nombra Corriente del Lazo en el Golfo de México.

Promedios mensuales de la circulación durante los meses de estudio (Fig. 5) muestran cambios en la latitud de encuentro entre la Corriente Caimán y la Península de Yucatán. Por ejemplo, en septiembre de 2018 (verano), la Corriente Caimán estuvo más desplazada hacia el norte (se observan remolinos frente a Belice), por lo que la Corriente de Yucatán nació esencialmente al norte de Banco Chinchorro. En contraste, en abril de 2019 (primavera), la Corriente Caimán se observó desplazada hacia el sur (no se observan remolinos frente a Belice), por lo que la Corriente de Yucatán nació al sur de Banco Chinchorro. En abril de 2019, la Corriente Caimán en el Caribe mexicano también se observó un poco más lenta (Fig. 5). Aunque la latitud de encuentro entre la Corriente Caimán y la Península de Yucatán no parece tener una estacionalidad bien definida, Ezer et al. (2005) sugieren que en primavera-verano (otoño-invierno) la Corriente Caimán llega predominantemente por el sur (norte) de Banco Chinchorro, generando un flujo hacia el norte (sur) a través del canal de Banco Chinchorro.

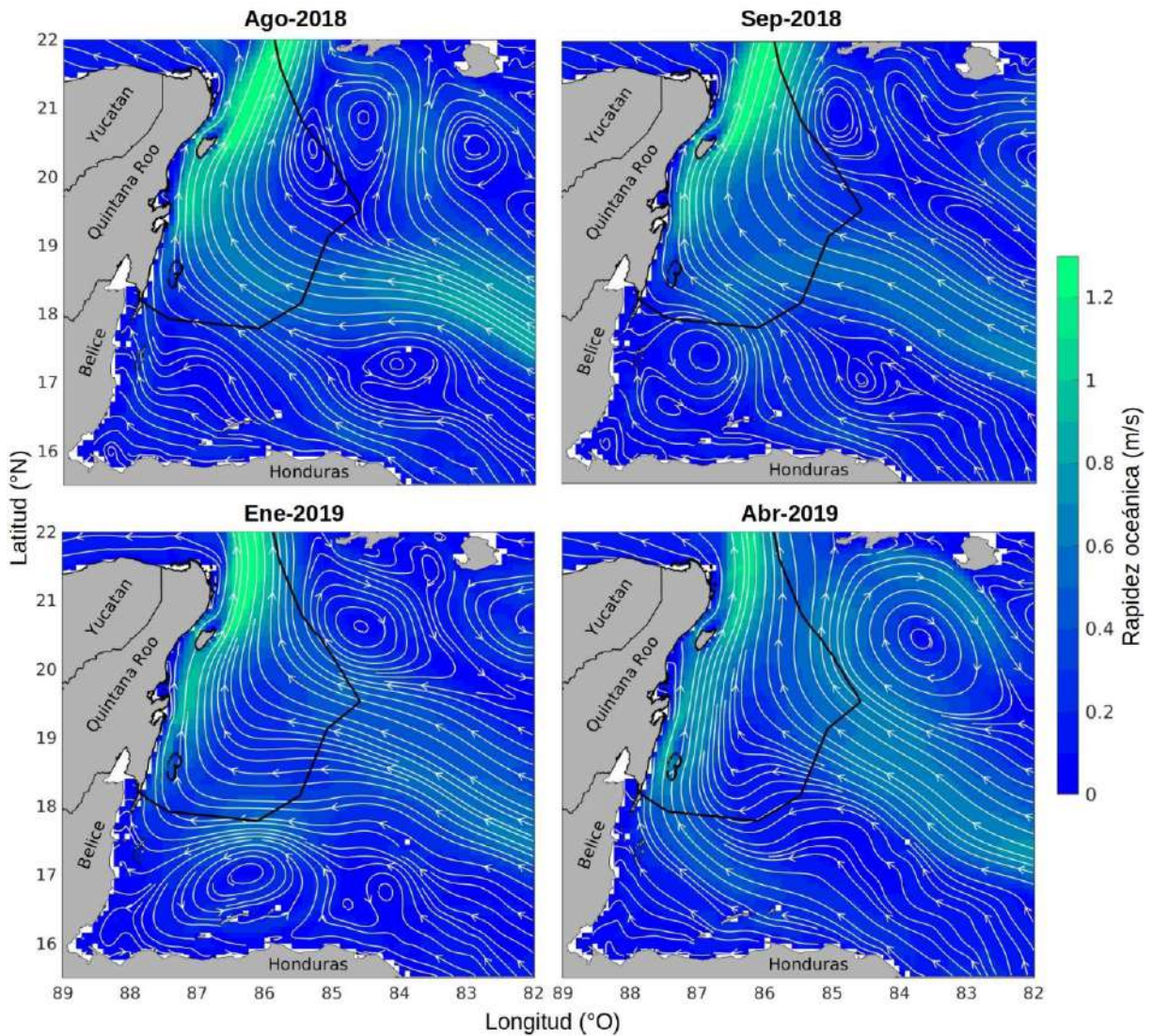


Fig. 5. Promedios mensuales de los campos de corriente superficial en el Caribe occidental, durante meses selectos. Los datos de corrientes provienen del modelo HYCOM Global.

Cerca de la costa, la circulación es compleja y responde al efecto combinado de vientos, batimetría, oleaje y corrientes marinas (Corriente de Yucatán y remolinos). Por ejemplo, los remolinos (e.g., el remolino costero de Ascensión-Cozumel) y los meandros se forman cuando la Corriente de Yucatán interactúa con estructuras morfológicas como puntas, bahías, la isla de Cozumel, los arrecifes o la misma orientación de la costa (Carrillo et al., 2015). Por otra parte, el Caribe mexicano cuenta con varias lagunas arrecifales, donde las corrientes son determinadas

principalmente por olas que rompen en las barreras arrecifales e impulsan el agua hacia la costa (Coronado et al., 2007) (Sección 2.4.).

2.4. Lagunas arrecifales

Las lagunas arrecifales consisten esencialmente de un cuerpo de agua costero tropical, protegido y separado del mar abierto por una barrera coralina continua o discontinua (Fairbridge, 1968; Ladd, 1977). Ejemplos de lagunas arrecifales en el Caribe mexicano son las de Akumal (Gil et al., 2015; Molina-Hernández et al., 2018) (Fig. 6) y Puerto Morelos (Coronado et al., 2007) (Fig. 7), las cuales se localizan frente a los extremos suroeste y noroeste del canal de Cozumel, respectivamente (Fig. 3). No obstante, lagunas arrecifales están presentes a lo largo de la mayor parte de la costa del Caribe mexicano (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003; Rioja-Nieto y Álvarez-Filip, 2019), siendo Banco Chinchorro el único atolón de dicha región (de Jesús-Navarrete, 2003) (Fig. 3). Las lagunas arrecifales del Caribe mexicano forman parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), el cual ocurre no sólo en el Caribe mexicano sino también en Belice, Guatemala y Honduras, extendiéndose a lo largo de ~1000 km de costa (Gress et al., 2019). Las lagunas arrecifales son de los ecosistemas más productivos y biodiversos del mundo: además de albergar corales, estas suelen dar cabida a manglares, praderas de pastos marinos, comunidades macroalgales, peces (casi un tercio de las especies de peces del mundo están en los arrecifes coralinos), tortugas y a muchas otras especies arrecifales y no arrecifales (Moberg y Folke, 1999; Yap, 2012). Asimismo, los bienes y servicios que ofrecen las lagunas arrecifales son muy diversos, incluyendo recursos alimenticios, medicinales, turísticos (la belleza natural atrae turismo), protección costera (e.g., de huracanes u oleaje), entre muchos más (Moberg y Folke, 1999). Sin embargo, las lagunas arrecifales del Caribe mexicano, y de otras partes del mundo, enfrentan importantes amenazas tales como la contaminación, la sobrepesca, el turismo mal regulado, el

cambio climático, la acidificación del océano y el arribo masivo de sargazo; estos factores han provocado una disminución en la salud y biodiversidad de los ecosistemas costeros (Baumann et al., 2019; Guimaraes et al., 2021; Velázquez-Ochoa et al., 2023).

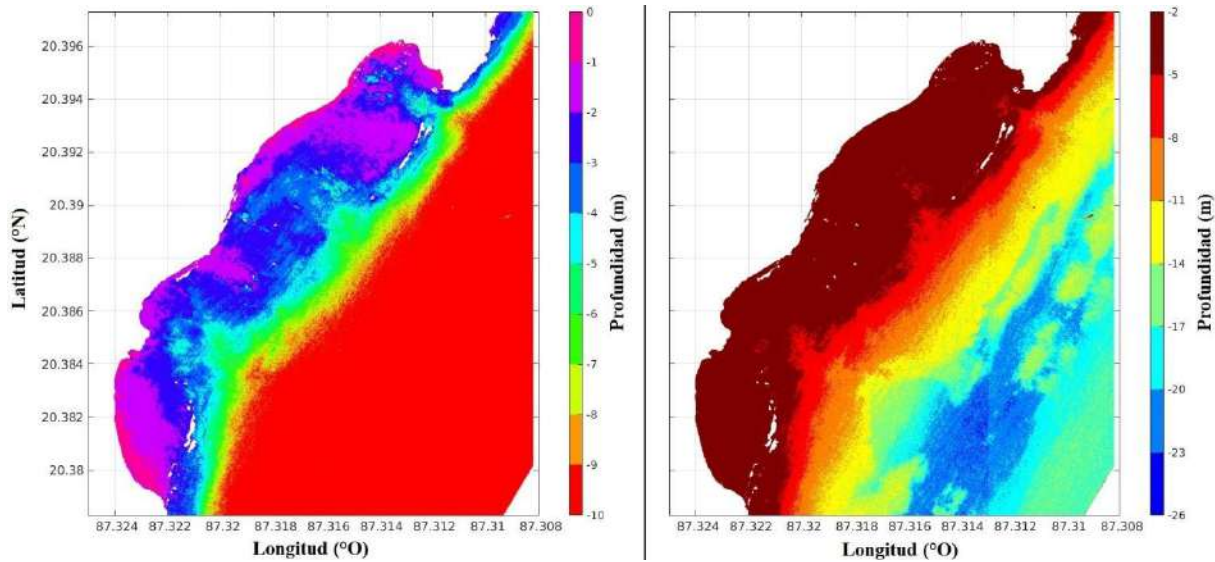


Fig. 6. Laguna arrecifal de Akumal y su batimetría (color de fondo). En el panel de la izquierda, la paleta de colores destaca la batimetría dentro de la laguna arrecifal. En el panel de la derecha, la paleta de colores destaca la batimetría por fuera de la laguna. Batimetría proporcionada por el Dr. Joaquín Garza Pérez (Garza-Pérez et al., 2004).

La circulación en las lagunas arrecifales se activa cuando hay condiciones de viento y oleaje más intensos que se dirigen del mar hacia la línea de costa, pues estas provocan flujo de agua por encima de la barrera arrecifal hacia el interior de la laguna (Fig. 7a). El ingreso de agua hace que el nivel de la superficie marina dentro de la laguna exceda al nivel de la superficie marina en el exterior; dicho excedente es compensado mediante la generación de corrientes de salida a través de las discontinuidades (bocas) de la barrera arrecifal (Coronado et al., 2007) (Fig. 7a). El sargazo en las lagunas arrecifales normalmente es depositado en la playa cuando los vientos y el oleaje se dirigen hacia ella con poca intensidad, cuando la circulación dentro de la laguna está en relativa

calma (Fig. 7b). En contraste, la remoción natural del sargazo arribado ocurre durante condiciones energéticas (Fig. 7a), pues olas más grandes y el aumento en el nivel del agua pueden hacer que el sargazo sobre la playa se reincorpore a la laguna arrecifal, en donde será depositado en el fondo o transportado a mar abierto en caso de que la macroalga conserve suficiente flotabilidad como para que las corrientes de salida la transporten (Rutten et al., 2021).

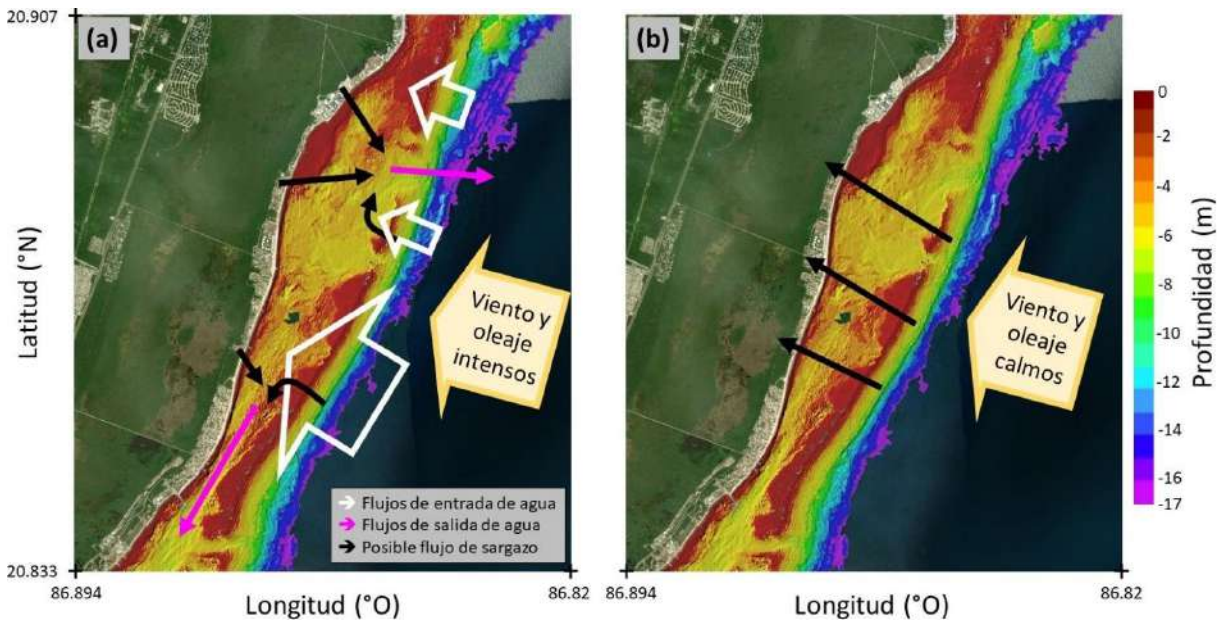


Fig. 7. Laguna arrecifal de Puerto Morelos y su batimetría (fondo en color). Se esquematiza el posible flujo de agua y sargazo durante condiciones de viento y oleaje intensos (a) y calmos (b). Adaptado de Coronado et al. (2007) y Rutten et al. (2021). Batimetría de Cerdeira-Estrada et al. (2022).

3° capítulo – Marco teórico: panorama en torno al problema de sargazo a gran escala

3.1. ¿Qué es el sargazo pelágico?

En México y otros países hispanohablantes, el nombre común “sargazo” suele ser utilizado para referirse a las especies de macroalgas pardas del género *Sargassum*, a la macroalga parda *Macrocystis pyrifera* (sargazo gigante), a la macroalga roja *Gelidium robustum* (sargazo rojo), así como a otras “plantas” que arriban en las playas (Castro-González et al., 1994; Aguilar-Rosas et al., 2003; Ortigón-Aznar y Ávila-Mosqueda, 2020; Godínez-Ortega et al., 2021). El término “sargazo pelágico” hace referencia a *S. fluitans* y *S. natans* (e.g., Rodríguez-Martínez et al., 2016; Aguilera-Méndez et al., 2023), las únicas dos especies conocidas del género *Sargassum* que realizan todo su ciclo de vida flotando en la superficie marina (holopelágicas) (Kilar et al. 1992; Guiry 2022; Stiger-Pouvreau et al. 2023). Sin embargo, existen otras especies del género *Sargassum* (e.g., *S. horneri*) que se encuentran flotando tras haber sido desprendidas del fondo, y en inglés han sido referidas como “pelagic *Sargassum*” (e.g., Kwon et al., 2019; Bao et al., 2022). Textos en inglés también hacen referencia a *S. fluitans* y *S. natans* mediante el término “holopelagic *Sargassum*” (e.g., Marsh et al., 2021; Goodwin et al., 2022), cuyo equivalente en español es “*Sargassum* holopelágico” o “sargazo holopelágico”. Para facilitar la redacción y lectura, muchos autores prefieren referirse al sargazo pelágico (u holopelágico) simplemente como “sargazo” (e.g., Leon, 2019; Martínez-González, 2019). En este trabajo, *S. fluitans* y *S. natans*, será referidas como “sargazo”.

Para entender mejor qué es el sargazo, conviene ubicarlo dentro del árbol filogenético que simplifica la historia evolutiva de la vida en la Tierra (Fig. 8). En la base del árbol está el ancestro

común de todos los seres vivos (LUCA), y conforme ascendemos, encontramos a los linajes que eventualmente surgieron. Primero aparecieron los procariontes (bacterias y arqueas), mientras que los eucariontes, dominio Eucarya, surgieron después. Dentro de una rama relativamente reciente de este dominio, el sargazo se ubica en el supergrupo SAR, filum Stramenopila, clase Phaeophyceae (que corresponde a las macroalgas pardas), orden Fucales y género *Sargassum* (Bringloe et al., 2020).

El sargazo, como todas las algas y plantas terrestres, realiza la fotosíntesis oxigénica, i.e., realizan el proceso mediante el cual se produce oxígeno molecular y materia orgánica a partir de agua, dióxido de carbono y luz solar (Nelson y Ben-Shem, 2004; Barsanti et al., 2008; Brinkert 2018). A pesar de que el sargazo tiene similitudes con plantas terrestres, macroalgas verdes y macroalgas rojas, su parentesco evolutivo es lejano (Fig. 8). El sargazo presenta pigmentos característicos de macroalgas pardas (clorofila-*c* y fucoxantina) (Kumar y Singh, 1979), y carece de una clara diferenciación de tejidos (como todas las macroalgas), por lo que no tiene hojas, tallos ni raíces verdaderas (Barsanti et al., 2008). En su lugar, presenta vesículas de gas que le proporcionan flotabilidad, estipes (pseudo tallos) y láminas (pseudo hojas) (Kilar et al., 1992). A diferencia de otras especies del género, *S. fluitans* y *S. natans* no presentan rizoide (estructura para fijarse al fondo) ni reproducción sexual (sólo se reproducen por fragmentación: cuando se rompen, los fragmentos sobreviven y pueden seguir creciendo) (Kilar et al. 1992).

El sargazo, tanto *S. fluitans* como *S. natans*, se distribuye exclusivamente en el océano Atlántico, principalmente en el Atlántico norte. Antes de 2011, las balsas de sargazo se concentraban en el Mar de los Sargazos, Mar Caribe y Golfo de México (Webster y Linton, 2013; Gower y King, 2011, 2019; van Tussenbroek et al., 2017). Sin embargo, a partir de ese año el sargazo también se ha encontrado de forma masiva en la Región de Recirculación NorEcuatorial

(NERR, por sus siglas en inglés) (Gower y King, 2019; Wang et al., 2019; Johns et al., 2020; Jouanno et al., 2021; Skliris et al., 2022). De esta manera, cuando hay una mayor proliferación de sargazo (en primavera y verano), este llega a extenderse masivamente desde el oeste de África hasta el Mar Caribe y Golfo de México, constituyendo la floración macroalgal más grande del mundo: el “Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico” (Wang et al., 2019).

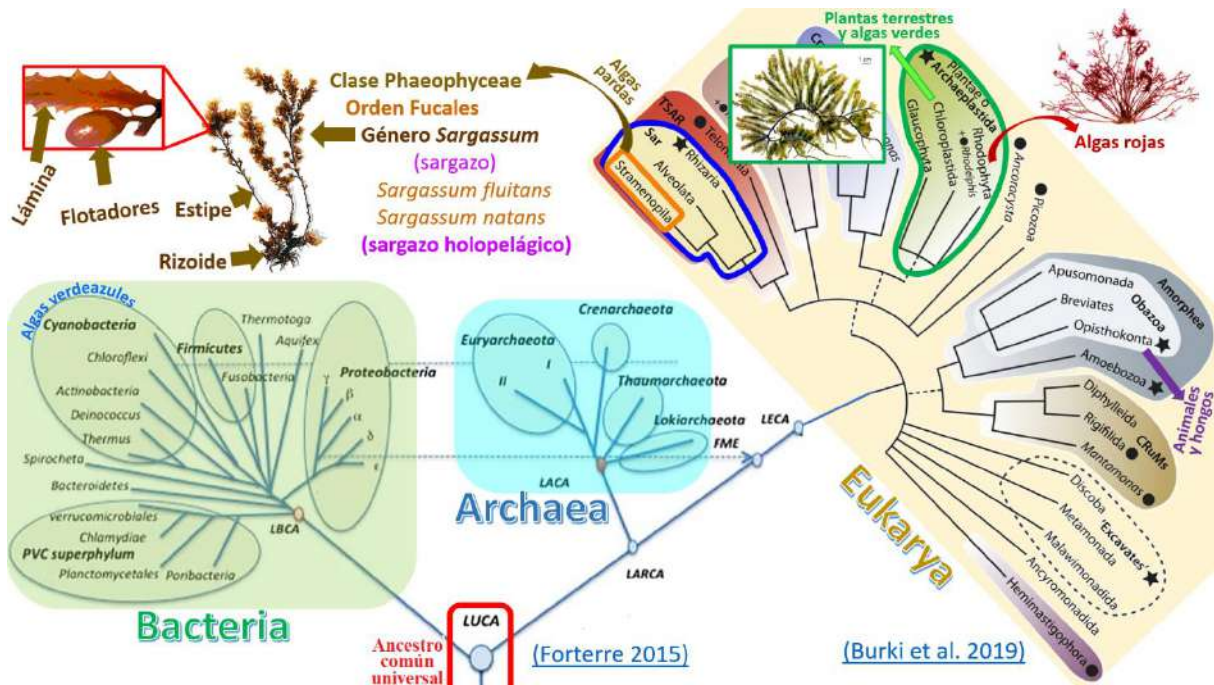


Fig. 8. Lugar del sargazo dentro del árbol filogenético de la vida en la Tierra. Las macroalgas, y las algas en general, constituyen un grupo de organismos pertenecientes a linajes muy diferentes. Las macroalgas pardas, como el sargazo, tienen una relación lejana tanto con las plantas terrestres como con las macroalgas rojas y verdes, aunque pueden lucir similares. *Sargassum fluitans* y *S. natans* son las únicas especies del género *Sargassum* que carecen de rizoide, lo cual es consistente con su naturaleza holopelágica.

3.2. Características biológicas relevantes

3.2.1. Reproducción

La reproducción de los talos de sargazo, entendida como el proceso mediante el cual se generan nuevos individuos (talos), se da exclusivamente por fragmentación vegetativa; es decir, cuando un talo se rompe, los fragmentos resultantes pueden continuar viviendo individualmente (Butler et al., 1983; Stoner, 1983; Kilar, 1992). Este tipo de reproducción asexual presenta varias ventajas, por ejemplo: (a) permite que un solo individuo produzca descendencia sin la necesidad de encontrar un compañero o invertir energía en la producción de gametos; esto puede ser más eficiente en términos de recursos y tiempo, (b) los fragmentos presentan una alta tasa de supervivencia al no haber etapas de vida temprana que requieran un tiempo de maduración, (c) si un organismo tiene características genéticas deseables que lo hacen exitoso en su entorno, la reproducción asexual permite la conservación y propagación de esos rasgos sin la variabilidad genética introducida por la reproducción sexual, y (c) en condiciones adecuadas, los organismos que se reproducen asexualmente pueden multiplicarse rápidamente, lo que puede ser beneficioso para colonizar nuevas regiones con características ambientales a las que ya estén adaptados (Tiébré M-S, 2007; Thomas et al., 2012; Albert et al., 2015; Cruz et al., 2017). A pesar de estas ventajas, la reproducción asexual también tiene desventajas significativas, como la falta de variabilidad genética que puede ser esencial para la adaptación a entornos cambiantes y la evolución a largo plazo (Crow 1994; Agrawal, 2001).

3.2.2. Crecimiento

El crecimiento de los talos de sargazo se refiere al aumento de su biomasa, lo cual involucra reproducción mitótica por parte de las células del talo, esencialmente en los meristemos apicales

(Tsukidate, 1984; Hanisak y Samuel, 1987). Siendo consistente con el concepto de crecimiento poblacional en Snider y Brimlow (2013), el crecimiento poblacional del sargazo podría definirse como el aumento en el número de individuos, y consecuentemente de la biomasa, que conforman a la población de sargazo, lo cual involucra reproducción y crecimiento de los talos individuales. En esta sección se hace referencia al crecimiento individual más que al poblacional.

Originalmente se pensaba que el sargazo presentaba ritmos muy lentos de crecimiento (Carpenter y Cox, 1974; Mann et al., 1980), alcanzando duplicaciones de biomasa en 10 a 100 años (Parr, 1939; Lapointe 1986). Sin embargo, mediciones de tasas de crecimiento han demostrado lo contrario; en aguas neríticas, el sargazo puede requerir de tan sólo ~10 días para duplicar su biomasa (Lapointe, 1986; Hanisak y Samuel, 1987; Lapointe et al., 2014; Magaña-Gallegos et al., 2023a, 2023b; Changeux et al., 2023; Corbin y Oxenford, 2023). No obstante, las tasas de crecimiento del sargazo se reportan muy variables (Tabla I), con tiempos de duplicación entre 7 días (Magaña-Gallegos et al. 2023b) y 347 días (Changeux et al., 2023). De acuerdo con Lapointe (1986), el crecimiento de sargazo suele ser lo suficientemente rápido como para superar las pérdidas por hundimiento, arribo y herbívora, lo cual se ha confirmado con la proliferación masiva del sargazo a partir de 2011, que ha conducido al desarrollo de la floración macroalgal más grande del mundo (Wang et al., 2019).

El crecimiento del sargazo está influenciado por múltiples factores, incluida la disponibilidad de nutrientes en el ambiente, la temperatura, la salinidad, la disponibilidad de luz solar, interacciones bióticas, el morfotipo del sargazo, el estado de reservas internas de nutrientes y posiblemente mecanismos internos del ciclo de vida (Lapointe, 1986; Hanisak y Samuel, 1987; Lapointe et al., 2014; Jouanno et al., 2021; Magaña-Gallegos et al., 2023a, 2023b). Falta por entender como los diversos factores modulan las tasas de crecimiento del sargazo, pues las

investigaciones no son del todo concluyentes. Por ejemplo, Lapointe (1986) y Lapointe et al. (2014) reportan que el sargazo crece más en aguas neríticas, debido a su mayor contenido de nutrientes, que en aguas oceánicas; sin embargo, Changeux et al. (2023) reportan tasas de crecimiento muy bajas (similares e incluso menores a las reportadas en el Mar de los Sargazos) en aguas neríticas de Martinique Island. Asimismo, Magaña-Gallegos et al. (2023b), Changeux et al. (2023) y Corbin y Oxenford (2023) encuentran que el morfotipo con un crecimiento más rápido es *Sargassum fluitans* III, pero Magaña-Gallegos et al. (2023b) observaron un crecimiento más rápido de *Sargassum natans* VIII en aguas de Puerto Morelos, mientras que Lapointe et al. (2014) no encontraron diferencias claras entre las tasas de crecimiento de *S. fluitans* y *S. natans*. El efecto de la temperatura tampoco es del todo claro; Hanisak y Samuel (1986) y Magaña-Gallegos et al. (2023b) encontraron que el crecimiento de todos los morfotipos del sargazo suele disminuir a temperaturas superiores a los 30°C, pero Magaña-Gallegos et al. (2023a) observaron una aceleración del crecimiento de *Sargassum fluitans* III a los 31°C. También se ha mostrado que a una misma temperatura el sargazo puede presentar tasas de crecimiento considerablemente diversas (Magaña-Gallegos et al., 2023b). Algunos autores sugieren que el aumento en la disponibilidad de nutrientes es el principal responsable del aumento sin precedentes de la biomasa de sargazo (Lapointe, 1986; Lapointe et al., 2014, 2021; Skliris et al., 2022), pero se requiere de más investigación al respecto (Magaña-Gallegos et al., 2023b).

Tabla I. Tasas de crecimiento exponencial, expresadas como tiempo de duplicación (días), que se han reportado para los diferentes morfotipos de sargazo. Se presentan los valores correspondientes a la tasa de crecimiento mínima (Min), media (Med) y máxima (Max). Nótese que conforme la tasa de crecimiento aumenta, el tiempo de duplicación se acorta. (–) No reportado. Revisar el Apéndice *a* para detalles sobre el cálculo del tiempo de duplicación.

\ Morfotipos	Tasas de crecimiento exponencial expresadas como tiempo de duplicación (días)												Detalles			
	<i>S. fluitans</i> III			<i>S. natans</i> VIII			<i>S. natans</i> I			<i>S. natans</i> –						
Autores \	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Localidad	Temperatura (°C)	Ambiente	Periodo de medición
Lapointe (1986)	–	32	–	–	–	–	–	–	–	–	29	–	Cerca de Eleuthra, Bahamas	28 a 30	Agua oceánica (shipboard)	Entre el día 0 y 7-10
Lapointe (1986)	–	28	–	–	–	–	–	–	–	–	22	–	Looe Key	28 a 30	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 0 y 7-10
Hanisak y Samuel (1987)	–	–	9	–	–	–	–	–	–	–	22	14	Florida	24 a 30	Provasoli's enriched seawater (culture dishes)	Entre el día 0 y 21
Lapointe et al. (2014)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	200	115	48	Mar de los Sargazos	–	Agua oceánica (shipboard)	Entre el día 0 y 4-6
Lapointe et al. (2014)	–	20	–	–	–	–	–	–	–	–	24	–	Twin Cays	–	Agua nerítica (shipboard)	Entre el día 0 y 4-6
Lapointe et al. (2014)	–	25	–	–	–	–	–	–	–	–	25	–	Glovers Reef	–	Agua nerítica (shipboard)	Entre el día 0 y 4-6
Lapointe et al. (2014)	–	11	–	–	–	–	–	–	–	–	18	–	Dry Tortugas	–	Agua nerítica (shipboard)	Entre el día 0 y 4-6
Lapointe et al. (2014)	–	13	–	–	–	–	–	–	–	–	11	–	Looe Key	–	Agua nerítica (shipboard)	Entre el día 0 y 4-6
Lapointe et al. (2014)	–	33	–	–	–	–	–	–	–	–	20	–	Miami	–	Agua nerítica (shipboard)	Entre el día 0 y 4-6
Lapointe et al. (2014)	–	20	–	–	–	–	–	–	–	–	20	–	Cape Fear	–	Agua nerítica (shipboard)	Entre el día 0 y 4-6

Tabla I. Continuación.

\ Morfotipos	Tasas de crecimiento exponencial expresadas como tiempo de duplicación (días)												Detalles			
	<i>S. fluitans III</i>			<i>S. natans VIII</i>			<i>S. natans I</i>			<i>S. natans –</i>						
Autores \	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx	Localidad	Temperatura (°C)	Ambiente	Periodo de medición
Magaña-Gallegos et al. (2023a)	83	–	26	26	–	18	–	–	–	–	–	–	Puerto Morelos	27 a 29	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 0 y 21
Magaña-Gallegos et al. (2023a)	40	25	20	67	22	16	–	–	–	–	–	–	Puerto Morelos	28	Agua nerítica (<i>ex situ</i>)	Entre el día 0 y 10
Magaña-Gallegos et al. (2023a)	–	14	–	50	22	15	–	–	–	–	–	–	Puerto Morelos	31	Agua nerítica (<i>ex situ</i>)	Entre el día 0 y 10
Magaña-Gallegos et al. (2023b)	31	13	9	53	15	7	33	15	7	–	–	–	Puerto Morelos	22	Agua nerítica (<i>ex situ</i>)	Entre el día 0 y 5
Magaña-Gallegos et al. (2023b)	23	13	10	45	17	10	26	15	7	–	–	–	Puerto Morelos	25	Agua nerítica (<i>ex situ</i>)	Entre el día 0 y 5
Magaña-Gallegos et al. (2023b)	16	10	7	29	19	14	37	16	9	–	–	–	Puerto Morelos	28	Agua nerítica (<i>ex situ</i>)	Entre el día 0 y 5
Magaña-Gallegos et al. (2023b)	36	14	8	56	22	10	53	16	8	–	–	–	Puerto Morelos	31	Agua nerítica (<i>ex situ</i>)	Entre el día 0 y 5
Changeux et al. (2023)	35	17	13	36	30	25	58	33	29	–	–	–	Martinique Island	28 a 31	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 0 y 9
Changeux et al. (2023)	20	11	11	347	17	12	77	33	14	–	–	–	Martinique Island	28 a 31	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 0 y 3
Changeux et al. (2023)	22	16	13	–	25	12	–	36	9	–	–	–	Martinique Island	28 a 31	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 3 y 6
Changeux et al. (2023)	–	35	13	–	139	39	–	–	35	–	–	–	Martinique Island	28 a 31	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 6 y 9
Corbin y Oxenford (2023)	14	10	8	63	27	20	50	18	14	–	–	–	Barbados	27.6	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 0 y 6
Corbin y Oxenford (2023)	36	15	11	167	31	19	167	24	12	–	–	–	Barbados	29.6	Agua nerítica (<i>in situ</i>)	Entre el día 0 y 6

3.2.3. Adquisición eficiente de recursos

El sargazo posee ciertas características que le confieren ventajas para sobrevivir en aguas oligotróficas, como las del Mar de los Sargazos. Por ejemplo, la estructura y composición de su pared celular (e.g., mucilaginoso y rico en alginatos) propicia la captación de nutrientes, incluidos el nitrógeno, fósforo y hierro (Lapointe, 1995; Deniaud-Bouët et al., 2014; Deniaud-Bouët et al., 2017; Kloareg et al., 2021; Lapointe et al., 2021; Beuder y Braybrook, 2023; Mazéas et al., 2023). Por otro lado, al flotar en la superficie, e incluso sobresalir un poco por encima de ella, el sargazo es uno de los primeros organismos marinos que capta nutrientes atmosféricos una vez disueltos en la superficie marina; estos nutrientes pueden venir, por ejemplo, en el polvo del Sahara (Reichholf, 1986; Rizzolo et al., 2017). Asimismo, el sargazo tiene acceso inmediato a la luz solar que llega a la superficie, mientras que evita que un porcentaje importante de la misma penetre más profundo y pueda ser aprovechada por otros organismos (Bach et al., 2021; Boyd et al., 2022; Wu et al., 2022). En las zonas costeras, el efecto de reducción de luz solar en la columna de agua se intensifica con la generación de las mareas marrón del sargazo (van Tussenbroek et al., 2017).

3.2.4. Plasticidad fenotípica

La plasticidad genotípica se puede entender como la capacidad de genotipos individuales para producir distintos fenotipos dependiendo de las condiciones ambientales (DeWitt y Scheiner, 2004; Pigliucci et al., 2006; Fusco y Minelli, 2010). En donde genotipo se refiere al conjunto de genes de un individuo, mientras que fenotipo se refiere a la expresión de su genotipo, manifestada en características de apariencia, desarrollo, fisiología y comportamiento, entre otras (Gjuvsland et al., 2013; Peter y Lewontin, 2021; de Vienne, 2022). La plasticidad fenotípica permite que los individuos desarrollen características morfológicas, fisiológicas y/o etológicas más apropiadas para

afrontar el ambiente en el que se encuentren (Xue y Leibler, 2018; Gouvêa et al., 2023), lo cual eventualmente puede favorecer al crecimiento poblacional (Gouvêa et al., 2023).

Con frecuencia se ha reportado que las especies del género *Sargassum* presentan una alta plasticidad fenotípica, reconocida esencialmente mediante características morfológicas, lo cual ha dificultado su clasificación (Kilar et al., 1992; Mattio y Payri, 2011; Kantachumpoo et al., 2015; González-Nieto et al., 2020; Rosado-Espinosa et al., 2020; Sulistiyani et al., 2022; Yap-Dejeto et al., 2022; Gouvêa et al., 2023). Tradicionalmente se ha considerado que el sargazo que inunda al Atlántico norte está representado por un morfotipo –i.e., grupo de individuos con una morfología distintiva, pero pertenecientes a la misma especie (Jerard et al., 2008)– de *S. fluitans* (*S. fluitans* III) y dos morfotipos de *S. natans* (*S. natans* VIII y *S. natans* I) (Schell et al., 2015). Sin embargo, González-Nieto et al. (2020), basados en análisis moleculares de marcadores genéticos, plantean la posibilidad de que 10 especies de *Sargassum* (incluidas *S. fluitans* y *S. natans*) en costas mexicanas del Caribe y Golfo de México sean en realidad una sola especie. En contraste, Dibner et al. (2021), también basados en análisis genéticos, sugieren que *S. natans* VIII y *S. natans* I podrían ser subespecies o especies distintas. Lo anterior evidencia la necesidad de realizar más investigaciones para determinar de manera inequívoca cuáles son los genotipos (e.g., especies) y fenotipos (e.g., morfotipos) que integran al sargazo.

3.2.5. Tolerancia fisiológica amplia

El sargazo está expuesto a condiciones ambientales muy cambiantes, para las cuales ha tenido que desarrollar tolerancia (Robledo et al., 2021). Por ejemplo, puede vivir en aguas costeras relativamente ricas en nutrientes, así como en aguas oligotróficas del mar abierto (e.g., en el Mar de los Sargazos), aunque en estas últimas su ritmo de crecimiento y productividad se han reportado

menores (Lapointe, 1986, 1995; Lapointe et al., 2014). Por otro lado, el sargazo puede tolerar un intervalo amplio de temperaturas. Hanisak y Samuel (1987) reportan un crecimiento óptimo del sargazo entre los 18°C y 30°C, mientras que su crecimiento se detiene a temperaturas por debajo de los 12°C, y disminuye drásticamente a temperaturas superiores a los 30°C. Magaña-Gallegos et al. (2023b) confirman un crecimiento rápido de sargazo entre los 22°C y 28°C, así como una disminución del mismo a los 31°C. Sin embargo, Magaña-Gallegos et al. (2023a) reportan un mayor crecimiento de *S. fluitans* III a los 31°C que a los 28°C. De acuerdo con Jouanno et al. (2021), es probable que el crecimiento del sargazo se detenga por encima de los ~40°C. El sargazo también es tolerante a cambios de salinidad; Hanisak y Samuel (1987) indican salinidades de 36 a 42 permiten un crecimiento óptimo del sargazo, mientras que salinidades de 30 o menos reducen su crecimiento a la mitad. La pared celular del sargazo no sólo captura nutrientes, sino que también es un buen biosorbente de metales pesados (principalmente arsénico) (Saldarriaga-Hernández et al., 2020; Devault et al., 2021a, 2021b); consecuentemente, el sargazo es altamente tolerante a dichos contaminantes, incluso más que las algas verdes y rojas (de Souza et al., 2020; Saldarriaga-Hernandez et al., 2020).

3.2.6. Falta de depredadores

Si bien se ha encontrado sargazo en el contenido estomacal de diversas especies, incluidas tortugas (Witherington et al., 2012; Howell y Shaver, 2021), aves (Moser y Lee, 2012) y peces (Casazza, 2008), su consumo con frecuencia es accidental (Witherington et al., 2012), y no se conocen herbívoros grandes que se alimenten de sargazo de forma significativa (Butler et al., 1983; Godinez-Ortega et al., 2021). Lo anterior puede deberse a que la macroalga posee una pared celular que no es de fácil digestión y segrega sustancias que previenen la herbivoría (Cacabelos et al., 2010). El flujo de biomasa de sargazo hacia otros niveles tróficos parece estar mediado de manera

muy importante por microorganismos (Baker et al., 2018) y organismos carroñeros, especialmente cuando el sargazo se deposita en el fondo marino (Fleury y Drazen, 2013). En cualquier caso, la falta de organismos que consumen sargazo flotante es uno de muchos factores que contribuyen con su crecimiento masivo desde 2011.

3.2.7. Alta capacidad de dispersión

Los vientos junto con las corrientes marinas son agentes muy efectivos para la dispersión pasiva de organismos en la superficie del océano (Renner, 2004; Ferrer y Pastor, 2017; Kwon et al., 2019; Johns et al., 2020; Putman et al., 2020; Tong et al., 2021; Marsh et al., 2021, 2022; Allende-Arandía et al., 2023). En el Atlántico noroccidental, el sargazo siempre ha seguido un circuito migratorio en sentido horario: Mar de los Sargazos⇒Mar Caribe⇒Golfo de México⇒Mar de los Sargazos (Gower y King, 2011; Webster y Linton, 2013; Frazier, 2014; Hill, 2016). Johns et al. (2020) proponen que la nueva ocurrencia de sargazo en el Atlántico ecuatorial, a partir de 2011, se debe a que sargazo del Mar de los Sargazos logró viajar hasta el oeste de Europa y posteriormente hacia el sur, hasta establecerse en la NERR. Actualmente, la NERR parece ser la fuente principal de las cantidades masivas de sargazo que llegan hasta el Mar Caribe, Golfo de México y África occidental (Solarin et al., 2014; Addico y deGraft-Johnson, 2016; Franks et al., 2016; Wang et al., 2019; Fidai et al., 2020; Johns et al., 2020; Jouanno et al., 2021).

3.3. ¿Qué es lo bueno y lo malo respecto al sargazo?

El sargazo, al ser macroscópico, flotante y muy abundante, proporciona a la superficie marina características particulares que regularmente carece: estructura física sólida, compleja y extensa, que puede ser aprovechada como un hábitat pelágico que facilita descanso, refugio, alimentación, crianza, reproducción y transporte para muy diversos organismos (Coston-Clements et al., 1991;

Laffoley et al., 2011). Entre dichos organismos hay habitantes microscópicos, desde virus hasta eucariontes de todo tipo (Egan et al., 2013; Theirlynck et al., 2023). También hay una gran diversidad de invertebrados, incluidos artrópodos, anélidos y moluscos (Monroy-Velázquez et al., 2019), y varias especies de peces, incluidos anguilas, atunes, tiburones, marlines y peces voladores, entre otros (Casazza y Ross, 2008; Luckhurst, 2015; Alleyne et al., 2023). Además, hay megafauna como cetáceos, aves, tortugas y elasmobranquios (de Boer y Saulino, 2020). Por si fuera poco, algunas especies son consideradas endémicas del sargazo (Coston-Clements et al., 1991; Laffoley et al., 2011). Toda esta biodiversidad proporciona recursos pesqueros y atractivos turísticos que pueden traducirse en ganancias económicas, parte de las cuales ya han sido cuantificadas para la región del Mar de los Sargazos (Pendleton et al., 2014). Como productor primario fotosintético (al igual que el fitoplancton), el sargazo conforma parte de la base de la pirámide trófica, genera oxígeno respirable, secuestra dióxido de carbono, participa en los ciclos biogeoquímicos de muchos otros elementos, exporta materia y energía hacia el mar profundo, y hasta pudiera participar en la regulación del clima global (Falkowski, 1994, 2012; Baker et al., 2018; Bach et al., 2021; Hu et al., 2021; Marsh et al., 2023). Sin embargo, no todo es positivo; desde que el sargazo se estableció en la NERR en 2011, la macroalga ha tenido un crecimiento poblacional sin precedentes, y se han presentado arribos extraordinarios de sargazo en el oeste de África y este de América. Estos han causado evidentes daños a los ecosistemas costeros, a las pesquerías, al turismo, a la salud humana y a la economía (van Tussenbroek et al., 2017; Rodríguez-Martínez et al., 2019; Devault et al., 2021a, 2021b; Fraga y Robledo, 2022).

3.4. ¿Cómo y por dónde se desplaza?

Dado que el sargazo flota, pero carece de nado propio, su desplazamiento depende de la circulación oceánica y atmosférica. Antes de que el sargazo se estableciera en la NERR, la ruta de viaje del

sargazo se restringía a un circuito migratorio en sentido anticiclónico entre las regiones del Golfo de México, Mar de los Sargazos y Mar Caribe (Webster y Linton, 2013; Frazier, 2014; Hill, 2016) (Fig. 2). En dicho circuito, el sargazo absorbe una mayor cantidad de nutrientes en el Golfo de México y luego es transportado por la Corriente del Lazo y la Corriente del Golfo hacia el Mar de los Sargazos, en donde se acumula. Bajo la influencia de vientos del norte, el sargazo se distribuye más hacia el sur del Mar de los Sargazos y se favorece su ingreso al Mar Caribe, donde se incorpora a la Corriente del Caribe. Esta corriente, cuya dirección predomina hacia el oeste, se denomina Corriente Caimán cuando pasa al norte de Honduras, y Corriente de Yucatán cuando choca con la Península de Yucatán y se desvía hacia el norte. Los vientos dominantes en la región son los vientos alisios que se dirigen hacia el oeste, lo que es particularmente propicio para que ocurran arribos en la parte oriental de la Península de Yucatán. No obstante, una parte importante del sargazo reingresa al Golfo de México, cerrando el circuito migratorio (Lapointe, 1995; Gower y King, 2011; Webster y Linton, 2013; Frazier, 2014; Hill, 2016; Lapointe et al., 2014, 2021).

Johns et al. (2020) propusieron que vientos y corrientes atípicas de 2009-2010 provocaron que el sargazo escapara del Mar de los Sargazos y que eventualmente se estableciera en la NERR, desde 2011 a la fecha (Fig. 2); sin embargo, esta hipótesis aún necesita verificación. El sargazo que ahora se encuentra en la NERR, independientemente de la forma en la que llegó hasta ahí, sigue la migración estacional de la zona de convergencia intertropical (Johns et al., 2020). Cuando la zona de convergencia intertropical se desplaza hacia el norte en primavera-verano, se favorece el crecimiento de sargazo y su ingreso al Mar Caribe y Golfo de México (Johns et al., 2020), pudiendo llegar a formar el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (Wang et al., 2019). En otoño-invierno, la zona de convergencia intertropical regresa hacia la NERR, acarreando y reteniendo una fracción de sargazo que persistirá hasta la siguiente temporada de primavera-verano (Johns et al., 2020). Es

importante resaltar que el sargazo en el Mar Caribe, incluido el que arriba a las costas de México, puede tener orígenes diferentes, es decir, puede provenir del Mar de los Sargazos y de la NERR (Fig. 2).

3.5. ¿Qué pasa en la zona costera?

Muy cerca de la costa, por ejemplo, en la región del Sistema Arrecifal Mesoamericano, adquieren especial relevancia factores de la interacción océano-continente-atmósfera, como los procesos de plataforma continental, la influencia de la presencia de islas y barreras arrecifales, y la morfología de la costa en general, que inducen cambios en la circulación y generan surgencias, meandros y remolinos (Winant, 1980; Cetina et al., 2006; Carrillo et al., 2015; Kourafalou et al., 2015; Bosboom, y Stive, 2021). Además, las descargas de agua continental, superficiales o subterráneas, llevan nutrientes, materiales y contaminantes, generan frentes oceánicos y modifican la hidrodinámica local (Carruthers et al., 2005; Null et al., 2014; Carrillo et al., 2016; Parra et al., 2014, 2015, 2016; Camacho-Cruz et al., 2022). En el caso particular del Caribe mexicano, las descargas continentales pueden ocurrir directamente en lagunas arrecifales y en toda la zona costera directamente desde el fondo, tanto en forma de fuentes puntuales, como son los ojos de agua o manantiales submarinos, como en forma difusa a través de fracturas y atravesando la capa sedimentaria de los sistemas acuáticos costeros (Bauer-Gottwein et al., 2011; Carrillo et al., 2016; Parra et al., 2014, 2015, 2016; Estrada-Medina et al., 2019).

Por otro lado, el oleaje, la marea y el viento son procesos que tienen gran relevancia en la hidrodinámica y transporte dentro de lagunas arrecifales (Coronado et al., 2007), por ejemplo, las corrientes inducidas por el oleaje que rompe sobre el arrecife favorecen que el sargazo ingrese a las lagunas arrecifales y que posteriormente se deposite sobre la playa, cuando vientos suaves del este se dirigen hacia la misma (Rutten et al., 2021). Mientras que el arribo de sargazo a la playa

ocurre cuando los vientos y el oleaje son poco intensos, la remoción natural del sargazo regularmente pasa cuando hay oleaje intenso y el nivel del agua se eleva, cubriendo y removiendo enérgicamente a la pila de sargazo acumulado en la playa. El oleaje intenso también es capaz de lograr que el sargazo abandone la laguna arrecifal, pues se incrementan las corrientes de salida a través de las bocas de la laguna arrecifal cuando el oleaje genera un mayor gradiente en el nivel del agua entre la laguna y el mar adenaño (Rutten et al., 2021). El oleaje intenso constituye una fuerza que puede ser erosiva y de cambio morfológico de sistemas litorales (Dean et al., 2013; Bird y Lewis, 2015); si el agua marina tiene un alto contenido de sargazo, entonces el poder erosivo del oleaje se podría potenciar por un efecto de abrasión (Chen y Stephenson, 2014; Bertoni et al., 2016), aunque aún no hay publicaciones al respecto. No obstante, la remoción artificial del sargazo sobre las playas está asociada con la pérdida de arena (Roig-Munar et al., 2020), y también se sabe que el roce constante entre macroalgas y arrecifes daña físicamente a los corales (River y Edmunds, 2001; Manikandan et al., 2021) y propicia el intercambio de microorganismos patógenos (Vega et al., 2012). En contraste, el sargazo en moderadas cantidades y bajo determinadas condiciones podría actuar como una capa que reduzca la erosión de la playa (Webster et al., 2015; Gavio y Santos-Martínez, 2018).

El sargazo excesivo que permanece sobre la playa, o acumulado dentro de lagunas arrecifales, eventualmente se descompone, pueden desprenderse los metales pesados que acumuló, y pueden ocurrir daños ecológicos y para el humano (van Tussenbroek et al., 2017; Rodríguez-Martínez et al., 2019; Chávez et al., 2020; Resiere et al., 2021). Para tratar de aliviar el problema de sargazo en la playa, este es retirado y puesto más tierra adentro, pero si no se hace adecuadamente (e.g., colocando al sargazo seco sobre geomembranas), esto tiene altas

posibilidades de propiciar que los lixiviados contaminen el suelo, el acuífero, el mar y la biósfera (Chávez et al., 2020; Rodríguez-Martínez et al., 2023).

3.6. ¿Qué nutrientes y contaminantes lo afectan?

Como productor primario fotoautótrofo, el sargazo requiere de nutrientes para realizar la fotosíntesis y constituir su biomasa (Tyrrell, 2001; Perdue, 2009; Ho et al., 2003). Un nutriente puede ser entendido como un elemento o compuesto que es esencial (indispensable para que el organismo complete su ciclo de vida) o benéfico (no es esencial, pero beneficia al crecimiento y desarrollo del organismo) para el desarrollo o crecimiento de un organismo (Brown et al., 2022). Entre los nutrientes esenciales, referidos en su forma elemental, que se necesitan en mayor cantidad (macronutrientes) están el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo (Broyer y Stout, 1959; Kirkby 2012; Nadeem et al., 2018). Cabe destacar que los primeros tres no se suelen administrar como fertilizantes, razón por lo que ordinariamente no se denominan nutrientes (Broyer y Stout, 1959). Existen otros nutrientes (e.g., hierro), los micronutrientes, que también son esenciales para los fotoautótrofos, pero se requieren en cantidades mínimas (Ho et al., 2003; Perdue, 2009; Nava-Jiménez et al., 2022).

En el Atlántico Norte, los nutrientes que más limitan el crecimiento de sargazo, y de los fotoautótrofos en general, son fósforo y nitrógeno, porque su concentración en dicha región es escasa respecto a la biológicamente requerida (Lapointe, 1986; Moore et al., 2013; Mahowald et al., 2017; Wang et al., 2019b; Lapointe et al., 2021). El hierro también puede limitar el crecimiento de fotoautótrofos en el Atlántico Norte (Menzel y Ryther, 1961; Wu y Boyle, 2002; Mills et al., 2004), aunque generalmente la concentración de hierro en dicha región es relativamente alta (Moore y Braucher, 2007), posiblemente por la influencia del polvo del Sahara (Jickells et al., 2005; Olgun et al., 2011).

El sargazo también capta contaminantes; entre ellos, los metales pesados que llaman la atención debido a su naturaleza tóxica. Aunque la mayoría de los metales pesados ocurren en cantidades traza, muchos son dañinos incluso a muy bajas concentraciones; sus efectos tóxicos pueden ir desde irritación hasta cáncer y la muerte. El arsénico es el que más se ha reportado en el sargazo, y en concentraciones que despiertan preocupación (Rodríguez-Martínez et al., 2020; Dassié et al., 2021; Devault et al., 2021a, 2021b, 2022; Bam et al., 2022; Cipolloni et al., 2022; Ortega-Flores et al., 2022, 2023; Alleyne et al., 2023b). Entonces podría haber cierto riesgo de intoxicación para los organismos que interaccionan con el sargazo, y con los lixiviados derivados de él (Olguin-Maciél et al., 2022), siendo más susceptibles los individuos que ingieran sargazo (Yokoi y Konomi, 2012; Singh et al., 2023), así como aquellos en estadios de vida temprana (Antonio-Martínez et al., 2020). Debido a la falta de estudios, el efecto real de los contaminantes en el sargazo sobre las especies marinas que conviven con él aún no es bien entendido.

La disponibilidad de nutrientes y contaminantes en la superficie marina no es igual en todas partes. En general, la zona costera con descargas fluviales es particularmente rica en nutrientes y contaminantes, presentando una mayor abundancia de organismos fotosintéticos, aunque la región de surgencia ecuatorial y otras regiones con surgencias también presenta una producción biológica relativamente elevada (Ryther, 1969; Sigman y Hain, 2012). Las aguas son oligotróficas (de escasos nutrientes) fuera de las surgencias y de las plataformas continentales con descargas fluviales, por lo que el crecimiento de los organismos es limitado, sobre todo en los grandes giros oceánicos (Leonelli et al., 2022). Consistente con lo anterior, se ha reportado un mayor crecimiento y productividad de sargazo en aguas del Atlántico Noroccidental con un mayor contenido de nutrientes, e.g., en aguas neríticas (Lapointe, 1995; Lapointe et al., 2014, 2021; Godínez-Ortega et al., 2021). En la NERR no se han medido tasas de crecimiento de sargazo, pero ahí también podrían

ser relativamente altas. Asimismo, la emisión de nutrientes al ambiente marino causada por actividades humanas es frecuentemente asociada con la proliferación de diversas macroalgas en diferentes partes del mundo (Smetacek y Zingone, 2013; Doubleday y Connell, 2018; Zhang et al., 2019; Xiao et al., 2020; Lapointe et al., 2021; Liu et al., 2021; Bermejo et al., 2023).

Nuevos nutrientes y contaminantes llegan a la superficie marina de distintas maneras: pueden venir con surgencias de aguas más profundas (Kämpf y Chapman, 2016), en descargas de agua continental (Smith et al., 2003; da Cunha et al., 2007), desde la atmósfera (Jickells et al., 2016), o ser producidos por los mismos organismos de la zona fótica (Lapointe et al., 2014; Benavides y Voss, 2015). Los organismos no producen nuevos elementos, sólo los reciclan, pero pueden producir nutrientes como compuestos, por ejemplo, cianobacterias diazótrofes epífitas del sargazo (e.g., *Oscillatoria* spp. y *Dichothrix fucicola*) pueden utilizar nitrógeno molecular (N_2) para producir compuestos nitrogenados –amoníaco (NH_3) que rápidamente se ioniza a amonio (NH_4^+) (Rascio y La Rocca, 2013)– que funcionan como nutrientes para otros organismos, incluido el sargazo (Johnson et al., 2023). Así, el sargazo puede recibir nutrientes de los organismos que viajan junto con él; no sólo del fitoplancton diazótrofo sino también de los desechos de peces (e.g., amoníaco), entre otros (Lapointe et al., 2014; Johnson et al., 2023).

Las surgencias con mayor relevancia en cuanto al aporte de nutrientes para el sargazo son las del oeste de África y la ecuatorial del Atlántico (Oviatt et al., 2019; Johns et al., 2020), y surgencias más costeras del Caribe y Golfo de México (Andrade y Barton, 2015; Reyes-Mendoza et al., 2019). Los ríos más relevantes son el Amazonas, Orinoco, Congo y Mississippi (Oviatt et al., 2019; Johns et al., 2020; Lapointe et al., 2021), aunque también hay ríos menores en el Caribe, como los del norte de Colombia (Restrepo et al., 2014). El desierto del Sahara es el que aporta más polvo, relativamente rico en hierro, para el Atlántico Norte (Mahowald et al., 2018), aunque el

Caribe también tiene su propia zona desértica, el desierto de la Guajira, cuyo polvo puede ser depositado por el viento en las aguas del norte de Colombia, aunque su impacto sobre la biología no ha sido bien determinado (Andrade y Barton, 2005). La probabilidad de deposición por emisiones volcánicas, también relativamente ricas en hierro, es alta en los extremos este y oeste del noratlántico tropical (Olgun et al., 2011).

3.7. ¿Qué variables ambientales lo afectan?

La radiación solar, temperatura, salinidad y pH son algunas variables que también afectan la dinámica del sargazo. Se ha reportado que la intensidad de luz óptima para el sargazo es de 60 a 80 W m² (Hanisak y Samuel, 1987; Lapointe et al., 1995) y que su crecimiento máximo se da entre los 22°C y 28°C (Hanisak y Samuel, 1987; Magaña-Gallegos et al., 2023b). Por lo tanto, la NERR parece ser ideal para el sargazo en cuanto a condiciones de luz (Liang, 2018) y temperatura (Chang et al., 2013). El sargazo deja de crecer a temperaturas inferiores a los 14°C (Hanisak y Samuel, 1987) —las cuales pueden ocurrir al norte del Mar de los Sargazos (Chang et al., 2013)— y a temperaturas superiores a los 40°C (Jouanno et al., 2021) —por lo general, el Atlántico tropical no supera los 34°C (Chang et al., 2013)—. La salinidad óptima para el sargazo es de 36 a 42, mientras que salinidades menores a 30 reducen su crecimiento (Hanisak y Samuel, 1987), las cuales frecuentemente ocurren en la desembocadura de grandes ríos (Droghei et al., 2018). Respecto al pH, este es algo más ácido en el Atlántico ecuatorial, en el Caribe y hacia las costas, lo cual podría significar menos biocalcificación en estas regiones (Jiang et al., 2019), aunque se desconoce el impacto de esto sobre los biocalcificadores epífitos del sargazo. Por otro lado, se espera que el sargazo capte más contaminantes en aguas relativamente ácidas, más cálidas, más contaminadas y cuando hay un mayor tiempo de contacto entre el sargazo y los contaminantes (Saldarriaga-Hernández et al., 2020, 2020b). Las condiciones de turbulencia y mezcla (e.g., durante tormentas

y huracanes) también son importantes en la dinámica del sargazo, pues pueden hundirlo temporal o permanentemente, redistribuirlo en la superficie marina, fragmentarlo y/o causar el ascenso de nutrientes que favorezca su crecimiento (Woodcock, 1950, 1993; Johnson y Richardson, 1977; Sanchez-Rubio et al., 2017; Oviatt et al., 2019; Sosa-Gutierrez et al., 2022; Putman y Hu, 2022). Entonces posiblemente las tormentas y huracanes provocan renovación de sargazo, de forma tal que se hunde el sargazo viejo, el que está infestado por epibiontes calcáreos y presenta daños en sus flotadores, mientras que el sargazo joven, el que tiene mayor flotabilidad, consigue aprovechar el aumento de nutrientes para crecer. Este es un posible escenario, pero se necesita más investigación al respecto.

3.8. ¿Por qué ha proliferado masivamente?

No se sabe con certeza por qué desde 2011 el sargazo ha proliferado tanto, pero se piensa que las causas son múltiples, y que las actividades humanas a escala global juegan un papel muy importante (Smetacek y Zingone, 2013; Oviatt et al., 2019; Wang et al., 2020; Lapointe et al., 2018, 2021; Bermejo et al., 2023). Por un lado, la quema de combustibles fósiles ha impulsado un cambio climático, el cual conlleva aumento de dióxido de carbono, acidificación oceánica, calentamiento global, y cambios en la dinámica oceánica y atmosférica, entre muchos otros impactos (Höök y Tang, 2013; Johns et al., 2020; Soeder, 2021). Por otro lado, la deforestación, la extracción intensiva de fósforo y la fijación artificial de nitrógeno para hacer fertilizantes ha provocado un aumento desproporcionado de dichos nutrientes en el mar, habiendo una tendencia hacia la eutroficación (Rabalais et al., 2009; Smetacek y Zingone, 2013; Lapointe et al., 2021). La idea de que la proliferación masiva de sargazo en el Atlántico está relacionada con el cambio climático es consistente con la proliferación atípica de otras macroalgas flotantes en diferentes partes del mundo (Smetacek y Zingone, 2013; Wang et al., 2020; Bermejo et al., 2023). Si bien los cambios globales

inducidos por los humanos a un ritmo acelerado generalmente favorecen la extinción de especies, algunas especies como las del sargazo han logrado aprovechar dichos cambios para prosperar (Havel et al., 2015; Doubleday y Connell, 2018). Entonces, la proliferación atípica del sargazo debe de estar asociada no sólo a factores externos sino también a las características biológicas del sargazo mismo (sección 3.2). Es necesario realizar más investigaciones para saber con mayor precisión las causas y mecanismos por los que el sargazo ha tenido un crecimiento sin precedentes desde el año 2011.

3.9. ¿Cómo predecir los arribos masivos?

Una manera de estudiar y predecir el desplazamiento del sargazo, saber en dónde, cuándo y en qué cantidad va a arribar, es mediante el uso de modelos computacionales, acompañados de percepción remota y mediciones *in situ* (Kwon et al., 2019; Johnson et al., 2020; Marsh et al., 2022; Podlejski et al., 2023). La idea básica es detectar sargazo mediante satélites u observaciones directas, y luego usar modelos de deriva para estimar la trayectoria del sargazo detectado y su probabilidad de arribar a determinadas zonas; las predicciones son entonces validadas con observaciones (Xu et al. 2022; Aguilera-Méndez et al. 2023).

De acuerdo con Brooks et al. (2018), cuando se hacen predicciones de gran escala, para periodos de dos meses o más, se obtendrían resultados más realistas al considerar crecimiento y mortalidad en función de nutrientes y variables ambientales, pues al no ser considerados se subestimarían el área de distribución y la biomasa de sargazo. Para predicciones de menor escala, tanto espacial (más regionales) como temporal, el transporte y la distribución del sargazo se estimarían relativamente bien a partir de la advección por circulación oceánica y atmosférica (Brooks et al., 2018). Berline et al. (2020) también sugieren que la advección por sí sola puede predecir bien la distribución de sargazo, particularmente en regiones donde haya poco crecimiento

local. También se han considerado formas aún más sencillas de predecir arribos de sargazo a escala local, las cuales solo dependen de una interpretación cualitativa de sobreponer la detección satelital de sargazo a vectores de viento y/o de corrientes (Webster y Linton, 2013; Maréchal et al., 2017). Otros estudios han propuesto predecir el movimiento de sargazo mediante otro tipo de modelos; por ejemplo, Bernard et al. (2022) usaron métodos de aprendizaje automático para encontrar los tipos de circulación oceánica y atmosférica que más se asocian con los picos de arribo en determinada región.

3.10. ¿Cómo mitigar los arribos masivos?

Para evitar que el sargazo arribe a las playas, una de las acciones que se han implementado es la colocación de barreras flotantes en el mar. Posteriormente, se usan embarcaciones especializadas para recolectar sargazo en el mar cerca de la línea de costa. Este plan de acción es bueno pero limitado porque con frecuencia el sargazo logra fluir por encima, por los costados o por debajo (e.g., sargazo subsuperficial) de las barreras, y las embarcaciones son insuficientes para recoger las cantidades masivas del alga (Chávez et al., 2020; Gray et al., 2021; Oxenford et al., 2021). Los modelos computacionales podrían ser muy útiles aportando información de dónde y cuándo conviene colocar a las barreras para hacer un uso más eficiente de ellas, o a dónde y cuándo conviene enviar gente para realizar la limpieza de playa lo más pronto posible. El sargazo que logra arribar a las playas tiene que ser removido, y el uso de maquinaria, aunque no es recomendable, frecuentemente es inevitable (Chávez et al., 2020; Oxenford et al., 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2023). Puesto que el sargazo arriba masivamente, lo ideal sería poder aprovecharlo como recurso valioso, por ejemplo, para biorremediar maricultivos y efluentes, como biocombustible, y cuando el sargazo ya está limpio de contaminantes, también puede usarse como alimento o fertilizante, como fuente de antioxidantes, anticancerígenos, antimicrobianos, y demás compuestos

para la salud (Desrochers et al., 2022). Dado que sus campos de aplicación son muchos, se han propuesto esquemas de biorrefinerías y de economía circular que buscan aprovechar, reutilizar y reciclar lo más posible; sin embargo, aún no se implementan a gran escala, para lo cual falta mucha investigación y camino por recorrer (Milledge et al., 2016; Saldarriaga-Hernández et al., 2020b; Amador-Castro et al., 2021).

4° capítulo – Sistema Lagrangiano y fuentes de datos

4.1. Introducción

Un sistema Lagrangiano es un marco matemático-computacional utilizado para describir el comportamiento de un sistema mediante el análisis del movimiento de partículas dentro de un fluido. El comportamiento del sistema se describe en términos de coordenadas Lagrangianas, las cuales especifican la posición, velocidad y otras propiedades asociadas a cada partícula. Los modelos Lagrangianos son ampliamente utilizados para estudiar y predecir una variedad de procesos en sistemas complejos, como dinámicas de transporte en el océano y en la atmósfera (Lin, 2012; Lara-Hernández, 2012; Lara-Hernández et al., 2019; van Sebille et al., 2018), incluidas las del sargazo (ver revisión en Marsh et al., 2022). Por lo general, los estudios de dinámica del transporte de sargazo se han enfocado a escala de grandes regiones oceánicas, y adaptan o usan algoritmos Lagrangianos de propósito general, o que fueron desarrollados con otros objetivos. Por ejemplo, Ichthyop fue desarrollado para simular dinámicas de ictioplancton (peces), por lo que involucra procesos de desove, movimiento, crecimiento, mortalidad y reclutamiento (Lett et al., 2008). Desarrollar sistemas Lagrangianos para atender regiones, escalas espaciotemporales y objetivos particulares permite que el algoritmo sea más sencillo y eficiente, pues se implementan sólo las características necesarias para reproducir los procesos de interés. El objetivo que corresponde a este capítulo es desarrollar un sistema Lagrangiano eficiente para estimar la dinámica del transporte de sargazo en el Caribe mexicano.

A continuación, se mencionan algunas publicaciones en donde se han usado sistemas Lagrangianos para estudiar dinámicas de transporte de sargazo:

Franks et al. (2016) desarrollaron un código para seguir partículas virtuales pasivas en función de las corrientes proporcionadas por el experimento global del Modelo Oceánico de Coordenadas Híbridas (HYCOM, por sus siglas en inglés; <https://www.hycom.org/>), el cual tiene una resolución espacial de $1/12^\circ$. Su código usó un paso de tiempo Lagrangiano de 15 minutos, e interpola las corrientes a la posición y tiempo de cada partícula mediante un spline cúbico de Akima. Entonces, sembraron partículas en zonas costeras con arribo masivo de sargazo, y las siguieron hacia atrás en el tiempo durante un año para averiguar su región de origen: la Región de Recirculación NorEcuatorial (NERR; por sus siglas en inglés).

Brooks et al. (2018) usaron el código incluido en el modelo HYCOM para rastrear partículas virtuales en tres dimensiones (Halliwell et al., 2003), pero lo modificaron para considerar tanto flotabilidad del sargazo como seguimiento de partículas hacia atrás en el tiempo. En el código se usa un esquema de integración Runge-Kutta de 4° orden (para información sobre los métodos Runge-Kutta, consultar a Mathews y Fink, 1999) y datos de corrientes del HYCOM Global, con una resolución espacial de $1/12^\circ$ y temporal de 4 h. Las velocidades de las corrientes fueron interpoladas a la posición de las partículas usando 16 puntos vecinos siempre que fue posible, o menos puntos cuando estos no fueron suficientes, pudiendo llegar a un sólo punto en su caso. Brooks et al. (2018) también acoplaron un modelo biogeoquímico (con una resolución espacial de $1/4^\circ$) para estudiar el efecto de la luz y de la disponibilidad de nutrientes; concluyeron que cuando se modela la dinámica de sargazo a corto plazo (e.g., menor a dos meses), la advección por sí sola es el principal factor que determina la distribución del sargazo.

Putman et al. (2018) usaron Ichthyop v.2 (Lett et al., 2008) para simular el movimiento de sargazo, considerando un esquema de integración Runge-Kutta de 4° orden y un paso de tiempo Lagrangiano de 30 minutos. Calcularon la advección de partículas virtuales como función de las

corrientes marinas (obtenidas del HYCOM Global) y de arrastre directo sobre las partículas debido al viento (*windage*, en inglés), para tomar en cuenta que el sargazo se encuentra parcialmente expuesto a la atmósfera. El *windage* lo modelaron de manera empírica al adveccionar a las partículas con la dirección del viento y un porcentaje de su magnitud (i.e., velocidad); a dicho porcentaje de la magnitud del viento se le denomina *windage factor* (aquí traducido como factor de viento). La anterior es la forma que actualmente se suele utilizar para considerar el efecto del *windage* en modelos de transporte de sargazo y de otras entidades parcialmente sumergidas en la superficie marina (e.g., Ferrer y Pastor, 2017; Kwon et al., 2019; Johns et al., 2020; Putman et al., 2020; Tong et al., 2021; Marsh et al., 2021, 2022; Allende-Arandía et al., 2023). Putman et al. (2018) utilizaron un factor de viento del 1%, y usaron vientos del reanálisis de NCEP, cuyos datos tienen una resolución espacial de 2.5° y temporal diaria. No modelaron aspectos biológicos como el crecimiento de sargazo.

Brooks et al. (2019) actualizaron el código Lagrangiano de Brooks et al. (2018) para agregar efectos inerciales como función de la densidad y radio de las partículas virtuales. Realizaron experimentos utilizando datos de corrientes del HYCOM Global, y reportan que tras una semana de viaje puede haber diferencias de decenas de kilómetros entre la posición final de partículas con inercia y la de partículas sin inercia. Recuérdese que la inercia puede ser entendida como la resistencia que opone la masa a que se modifique su estado de movimiento o de reposo, incluyendo cambios en la rapidez o dirección del movimiento. Se esperaría que los talos de sargazo, al tener distinta masa, presenten flujos con distintos grados de desviaciones con respecto al flujo del medio que los transporta (corrientes y vientos) (Miron et al., 2020; Beron-Vera et al., 2020, 2021).

Putman et al. (2020) usaron Ichthyop v.2 (Lett et al., 2008) con un esquema de integración Runge-Kutta de 4° orden y un paso de tiempo Lagrangiano de 30 minutos. La advección de

partículas virtuales fue debida a las corrientes (obtenidas del Hycom Global) y al arrastre directo de sargazo debido al viento (con distintos valores del factor de viento). El viento se obtuvo del producto satelital *Blended Sea Winds*, el cual proporciona datos cada 6 h con una resolución espacial de $1/4^\circ$. No modelaron aspectos biológicos como el crecimiento de sargazo.

Johns et al. (2020) utilizaron Ichthyop para simular movimiento de sargazo de acuerdo con las velocidades tanto de corrientes del HYCOM Global como de vientos de NCEP/NCAR (usando un factor de viento de 1%). Ellos proponen que vientos y corrientes atípicas en 2010-2011 transportaron sargazo del Mar de los Sargazos hacia la NERR, en donde se favorece la acumulación de la macroalga por convergencia inducida por el viento.

Berline et al. (2020) usaron Ichthyop con un paso de tiempo de 30 minutos y un esquema de integración Runge-Kutta de 2^{do} orden. El modelo Lagrangiano usó campos de velocidad de corrientes generadas con el modelo MERCATOR-OCEAN (Lellouche et al., 2013) a $1/12^\circ$ de resolución horizontal. Además, usaron vientos de ECMWF HRES (Owens y Hewson, 2018) para considerar arrastre de sargazo por viento (usando distintos valores del factor de viento). Berline et al. (2020) sugieren que la región de acumulación de sargazo en el oeste de África se explica bien por la advección (debilitamiento de la Contracorriente Norecuatorial), mientras que la región de acumulación de sargazo al noreste de Brasil parece ser debida también a procesos de crecimiento no considerados en su modelo.

Marsh et al. (2021) usaron el algoritmo Lagrangiano ARIANE (Blanke y Raynaud, 1997), acoplado a corrientes y vientos de NEMO-ORCA12 (resolución horizontal de $1/12^\circ$), para diseñar un sistema de ensambles de pronóstico de deriva de sargazo. El ensamble lo construyen al considerar distintos valores del factor de viento, y su sistema también considera crecimiento, mortalidad y hundimiento de sargazo. parametrizados a partir de observaciones de tasas de

crecimiento (Lapointe, 1986; Hanisak y Samuel, 1987), mortalidad por temperatura (Hanisak y Samuel, 1987) y tasas de hundimiento (Jouanno et al., 2021).

4.2. Métodos

4.2.1. Sistema Lagrangiano

Se utilizó Matlab® para programar un sistema Lagrangiano que emplea datos libres de corrientes y de vientos para calcular la advección de partículas virtuales. Además, se incluyó un algoritmo para estimar crecimiento de las partículas virtuales en función de tasas de crecimiento de sargazo reportadas en la literatura y del estado trófico del agua de mar, estimado a partir de la concentración de clorofila-a. La intención fue que el sistema fuera sencillo y eficiente para simular el transporte de sargazo en el Caribe mexicano. Se realizaron análisis y experimentos numéricos para determinar el tiempo máximo de seguimiento de las partículas virtuales, los métodos de interpolación, el paso de tiempo y el orden del esquema Runge-Kutta más apropiados.

Para determinar el tiempo máximo de seguimiento de las partículas virtuales, estas se sembraron a lo largo de la costa del Caribe mexicano y se rastrearon hacia atrás en el tiempo hasta que salieran del Caribe mexicano. Esto dio una idea del tiempo que necesita el sargazo en aguas del Caribe mexicano para arribar en la región. Para determinar los métodos de interpolación más apropiados, se sembraron partículas virtuales al sur del canal de Cozumel, cerca de la línea de costa, y se siguieron hacia adelante en el tiempo; se seleccionaron los métodos de interpolación más eficientes y que permitieran un mejor flujo de las partículas virtuales en las cercanías de la línea de costa, particularmente a través del canal de Cozumel. Para determinar el paso de tiempo y el orden del Runge-Kutta, se liberaron partículas virtuales en el Caribe oriental y se siguieron por el tiempo máximo que se encontró apropiado (10 días). La advección de las partículas virtuales se calculó

con los Runge-Kutta de 1^{er}, 2^{do} y 4^{to} orden, y se usó un paso de tiempo de 1 min. Se cuantificó la diferencia de distancia entre la posición final (al décimo día) de las partículas virtuales que resultó al usar los distintos órdenes de Runge-Kutta. El orden del Runge-Kutta seleccionado fue el que tuvo un tiempo de ejecución más rápido y cuyos resultados no presentaron diferencias significativas con respecto al resultado del Runge-Kutta de 4^o orden.

Se construyó un modelo sencillo de crecimiento para proporcionar una primera aproximación del crecimiento del sargazo en el Caribe mexicano debido al estado trófico de la superficie marina. Para construir dicho modelo, se buscó una relación entre tasas de crecimiento de sargazo medidas en varias regiones del Atlántico (Lapointe et al., 2014) (Tabla I) y datos satelitales de concentración de clorofila-a (Sección 4.2.3). Se utilizaron las tasas de crecimiento (expresadas en duplicaciones/día) que se reportan en Lapointe et al. (2014), ya que es el único estudio para el cual se han medido tasas de crecimiento de sargazo en varias regiones del mundo, incluyendo aguas neríticas y de mar abierto. En aguas neríticas, Lapointe et al. (2014) midieron el crecimiento de *S. fluitans* y de *S. natans*, mientras que en aguas oceánicas sólo midieron el crecimiento de *S. natans*. Aunque Lapointe et al. (2014) no especifican morfotipos, es más probable que trabajaran con *S. fluitans* III y *S. natans* I (Magaña-Gallegos et al., 2023a). Dado que Lapointe et al. (2014) no encontraron diferencias claras entre el crecimiento de *S. fluitans* y *S. natans*, y probablemente no midieron crecimiento de *S. natans* VIII, el modelo de crecimiento no hace distinción entre morfotipos.

La idea de utilizar a la clorofila-a como predictor de crecimiento se sustenta en que la clorofila-a es un indicador del estado trófico de cuerpos de agua (Ignatiades, 2005; Watanabe et al., 2015). El fitoplancton, y por lo tanto la clorofila-a, abundan en aguas con suficientes nutrientes (e.g., en zonas neríticas y/o de surgencias) y con las condiciones adecuadas de temperatura, luz y

otras variables ambientales (Falkowski et al., 1992; Behrenfeld et al., 2006). Se asumió una respuesta fisiológica similar para el sargazo, ya que también es un fotoautótrofo pelágico y por lo general presenta tasas de crecimiento mayores en aguas neríticas que en aguas del mar abierto, lo cual sugiere una relación entre el crecimiento del sargazo y el estado trófico del agua de mar (Lapointe, 1995; Lapointe et al., 2014, 2021). Jouanno et al. (2021) también consideraron un modelo de crecimiento que depende de la concentración de nutrientes, la temperatura y la luz, pero agregaron el posible efecto de reservas de nutrientes internas del sargazo. Sin embargo, conocer el estado de las reservas de nutrientes del sargazo en el Caribe mexicano es un gran desafío, y la viabilidad de usar la estimación remota en este sentido requiere ser explorada (Fidai et al., *preprint*). El modelo de crecimiento, al asumirse que el sargazo responde de manera inmediata al estado trófico del agua, proporciona una estimación del crecimiento máximo que podría darse solamente por el estado trófico del agua y el tiempo de viaje de las partículas virtuales, basado en las tasas de crecimiento reportadas por Lapointe et al. (2014). No se pretende dar una descripción completa y precisa del crecimiento, sino una primera aproximación del orden de magnitud de la biomasa que se podría estar generando por la disponibilidad de nutrientes en el Caribe mexicano, recordando que esta investigación no está enfocada en los procesos biológicos sino en el transporte físico.

4.2.2. Datos de detección satelital de sargazo

Se utilizaron imágenes satelitales con detección de sargazo para obtener las coordenadas geográficas de los píxeles con sargazo. Dichas coordenadas se utilizaron para determinar los puntos de sembrado de las partículas virtuales, así como para realizar comparaciones entre la distribución del sargazo detectado satelitalmente y la distribución de las partículas virtuales aquí estimada. Las imágenes satelitales que se utilizaron fueron las de Landsat-8, el cual es un satélite de observación

de la Tierra, lanzado por la NASA en 2013 (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>). El satélite lleva un instrumento llamado Operational Land Imager (OLI) que captura imágenes de la Tierra en nueve bandas espectrales diferentes. Estas bandas incluyen el espectro visible y el infrarrojo cercano y medio. El OLI puede capturar imágenes en una resolución espacial de 15 a 100 metros, dependiendo de la banda, con un tiempo de remuestreo de 16 días. Las imágenes de Landsat-8 son muy útiles para monitorear los cambios en la superficie terrestre, incluyendo cambios en la cobertura vegetal y en la superficie del agua. Estas imágenes están disponibles de forma gratuita a través del portal EarthExplorer de la USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). La identificación de sargazo a partir de imágenes de Landsat-8 se realizó de acuerdo con el método multi-índice de Cuevas et al. (2018) y Uribe-Martínez et al. (2022), el cual genera un producto con una resolución espacial de 30x30 m.

4.2.3. Datos de clorofila

Se usaron los datos de concentración de clorofila-a (mg/m^3) generados por el Laboratorio Marino de Plymouth (<https://pml.ac.uk/>), el cual procesa diversos insumos satelitales de la Agencia Espacial Europea (ESA) y de la Iniciativa de Cambio Climático (CCI) (<https://doi.org/10.48670/moi-00283>). El producto derivado de la ESA-CCI se puede descargar de manera libre a través del portal de Servicio Marino de Copernicus (<https://marine.copernicus.eu/>), se proporciona en formato netCDF y contiene la concentración promedio mensual de clorofila-a desde septiembre de 1997, con una resolución horizontal aproximada de $1/30^\circ$. Como la mayoría de los productos satelitales, la detección satelital de clorofila-a está limitada por la presencia de nubes y la cobertura temporal de los satélites, de forma tal que las detecciones satelitales diarias e incluso los compuestos semanales suelen presentar muchas celdas de malla sin datos. Por lo tanto, proporcionar datos como compuestos (e.g., promedios) suele ser necesario para que la gran mayoría

de (o todas) las celdas del dominio de interés tengan datos efectivos. Los datos tienen la ventaja de que constituyen un producto global que se puede utilizar para una variedad de aplicaciones, como el seguimiento de la salud del ecosistema marino, la identificación de áreas de pesca productiva y el monitoreo de la calidad del agua (Brockmann y Stelzer, 2022; Colella et al., 2022).

4.2.4. Datos de vientos y corrientes

Las trayectorias de las partículas virtuales se modelaron como función de los vientos y corrientes oceánicas, las cuales se obtuvieron de conjuntos de datos que están disponibles de forma gratuita en Internet y son ampliamente utilizados por la comunidad científica.

Los vientos se obtuvieron del reanálisis de quinta generación para el tiempo y el clima global (ERA5) (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), así como del Sistema de Pronóstico Climático versión 2 (CFSv2) (<https://cfs.ncep.noaa.gov/>). Los datos de viento de ERA5 tienen una resolución espacial de aproximadamente 1/4 de grado y se actualizan cada hora. ERA5 utiliza la asimilación de datos para combinar estimaciones de modelos avanzados con diversas mediciones históricas de viento, como se describe en Hersbach et al. (2020). Mientras tanto, los vientos de CFSv2 se obtienen en una cuadrícula con una resolución horizontal de alrededor de 1/5 de grado y una resolución temporal de 1 h (<https://www.hycom.org/dataserver/ncep-cfsv2>). La asimilación de datos también se considera en CFSv2 (Saha et al., 2014). Se usaron datos de velocidad del viento de ERA5 y CFSv2 que corresponden a una altura de 10 m sobre la superficie del mar.

Las corrientes oceánicas se obtuvieron a partir de experimentos *nowcast* del Modelo Oceánico de Coordenadas Híbridas (HYCOM): (1) el HYCOM Global y (2) el HYCOM del Golfo de México (<https://www.hycom.org/>). El HYCOM Global tiene una resolución espacial de 1/12° y una resolución temporal de 3 horas. El HYCOM del Golfo de México tiene una resolución espacial

de $1/25^\circ$ y una resolución temporal de 1 hora. Ambos experimentos utilizaron la asimilación de datos a través del sistema Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) (Bleck, 2002; Cummings, 2005). Los datos utilizados de velocidad oceánica de ambos experimentos fueron las corrientes superficiales (0 m) y/o las corrientes promediadas verticalmente de 0 a 5 m, cada 3 horas.

Los datos de viento y corrientes carecen de una resolución lo suficientemente fina como para reproducir características geológicas y dinámicas de pequeña escala, las cuales determinan el proceso detallado de arribo de sargazo dentro de lagunas arrecifales, como el descrito por Rutten-et al. (2021). Por lo tanto, hay que tener claro que las estimaciones de arribo de las partículas virtuales aquí mencionadas no son 100% realistas pues no tienen la resolución para predecir arribos a escala de playa. Aunque los procesos finos de arribo de sargazo no estén incluidos, las partículas virtuales en el modelo se consideran arribadas cuando pasan de tener una posición en el agua a una posición sobre tierra, en función de la delimitación de la línea de costa en los datos de corrientes de HYCOM. Por lo tanto, el término “arribo” seguirá siendo utilizado en este estudio, lo cual facilita la redacción y comprensión del documento, pero el lector debe de tener en mente de que se trata sólo de una aproximación, la cual consideramos aceptable para las escalas de estudio abordadas.

4.2.4.1. Validación

Los vientos de los reanálisis ERA5 y CFSv2 se validaron con vientos observados de: (a) los campos medios globales de viento mezclado del Centro de Recursos Satelitales de IFREMER (CERSAT, por sus siglas en francés) (<https://doi.org/10.48670/moi-00185>), y (b) las estaciones meteorológicas de Puerto Morelos (<https://sammo.icmyl.unam.mx/>) y Punta Herrero (<http://www.mareografico.unam.mx/>) (Fig. 3). Los datos de IFREMER CERSAT tienen una resolución horizontal de $1/4^\circ$ y una resolución temporal de 6 horas. Este conjunto de datos se

construyó a partir de mediciones *in situ* y vientos medidos de forma remota con escaterómetros y radiómetros. Los datos de velocidad del viento de IFREMER CERSAT disponibles para el área de estudio durante agosto de 2018, septiembre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019 se compararon con los datos correspondientes de los reanálisis de ERA5 y CFSv2 (los datos de los reanálisis se interpolaron bilinealmente a las coordenadas de los datos de IFREMER CERSAT). En cuanto a la validación con las dos estaciones meteorológicas, de ellas se obtuvieron datos de velocidad del viento para cada hora que coincidieran con la temporalidad de los datos de los reanálisis de ERA5 y CFSv2 (se usaron los datos de los reanálisis correspondientes al punto sobre agua que estuviera más cercano a cada estación). Los datos de la estación meteorológica de Puerto Morelos estuvieron disponibles para los mismos meses y años, mientras que los datos de la estación meteorológica de Punta Herrero sólo estuvieron disponibles para enero de 2019 y abril de 2019. El coeficiente de correlación (CC) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) se utilizaron para comparar la velocidad del viento observada con la velocidad del viento de cada reanálisis.

Las corrientes superficiales tanto del HYCOM Global como del HYCOM del Golfo de México se compararon con las corrientes superficiales del Análisis en Tiempo Real de la Superficie del Océano (OSCAR, por sus siglas en inglés) (<https://www.esr.org/research/oscar/>). Los datos de OSCAR tienen una resolución horizontal de $1/3^\circ$ y una resolución temporal de cinco días. Las corrientes de OSCAR se calculan a partir de datos de altura de la superficie del mar, viento en la superficie del mar y temperatura de la superficie del mar, obtenidos a partir de mediciones satelitales e *in situ* (Bonjean y Lagerloef, 2002). Los datos de velocidad de corriente oceánica de OSCAR, disponibles para el área de estudio durante agosto de 2018, septiembre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019, se compararon con los datos correspondientes de los experimentos HYCOM. El CC y la RECM también se utilizaron como los parámetros estadísticos de referencia. Además

de tener una resolución relativamente baja, las corrientes de OSCAR se asocian a errores debidos, por ejemplo, a la ocurrencia de nubes, lluvia, vientos intensos, y a formulaciones que simplifican la realidad (Bonjean y Lagerloef, 2002; Johnson et al., 2007); por lo tanto, las corrientes de OSCAR no son necesariamente más cercanas a la realidad que las corrientes de HYCOM. La comparación entre las corrientes de OSCAR y las de HYCOM, más que una validación, proporciona un punto de referencia para determinar qué tan significativas pueden ser las diferencias entre las corrientes de los dos experimentos de HYCOM aquí utilizados.

4.3. Resultados

4.3.1. Sistema Lagrangiano

Se escribió en Matlab® un algoritmo Lagrangiano que rastrea hacia atrás y hacia adelante en el tiempo al movimiento de partículas virtuales en dos dimensiones, es decir, considerando las componentes u y v de la velocidad de corrientes y vientos. Las partículas virtuales se pueden sembrar de acuerdo con datos de detección satelital de sargazo o en cualesquiera coordenadas geográficas que se indiquen. El algoritmo se automatizó para usar datos tanto de corrientes del HYCOM Global y del HYCOM del Golfo de México como de vientos de los reanálisis de ERA5 y CFSv2. Además, es posible adveccionar partículas virtuales considerando un factor de viento variable, así como las corrientes de la superficie marina o el promedio vertical de las corrientes en los primeros cinco metros. También se incluyó un módulo sencillo de crecimiento en función del estado trófico del agua (estimado a partir de la concentración de clorofila-a) y de las tasas de crecimiento de sargazo reportadas en Lapointe et al. (2014), sin considerar un crecimiento diferencial entre los morfotipos de sargazo (no se cuenta con información concluyente para poder hacer esto). El módulo de crecimiento puede activarse o desactivarse según convenga al usuario.

El sistema Lagrangiano se construyó de forma tal que fuera simple y eficiente, incluyendo únicamente a las características necesarias que permitieran proveer de la forma más expedita los resultados imprescindibles para el manejo, de acuerdo con los objetivos planteados en el presente proyecto doctoral.

4.3.1.1. Posición inicial de las partículas virtuales

El sistema Lagrangiano se automatizó para realizar la siembra de partículas virtuales de tres maneras diferentes (Fig. 9):

- 1) Liberación de partículas virtuales sobre los 3267 vértices de una malla uniforme con resolución horizontal de $1/25^\circ$, y rotada $\sim 20^\circ$ en sentido horario para ajustarse a la cobertura espacial de las dos principales escenas de Landsat-8 que captan el Caribe mexicano.
- 2) Liberación de partículas virtuales cada $1/25^\circ$ a lo largo de la costa del Caribe mexicano.
- 3) Liberación de partículas virtuales en la coordenada central de cada píxel de Landsat-8 que se identificó con presencia de sargazo.

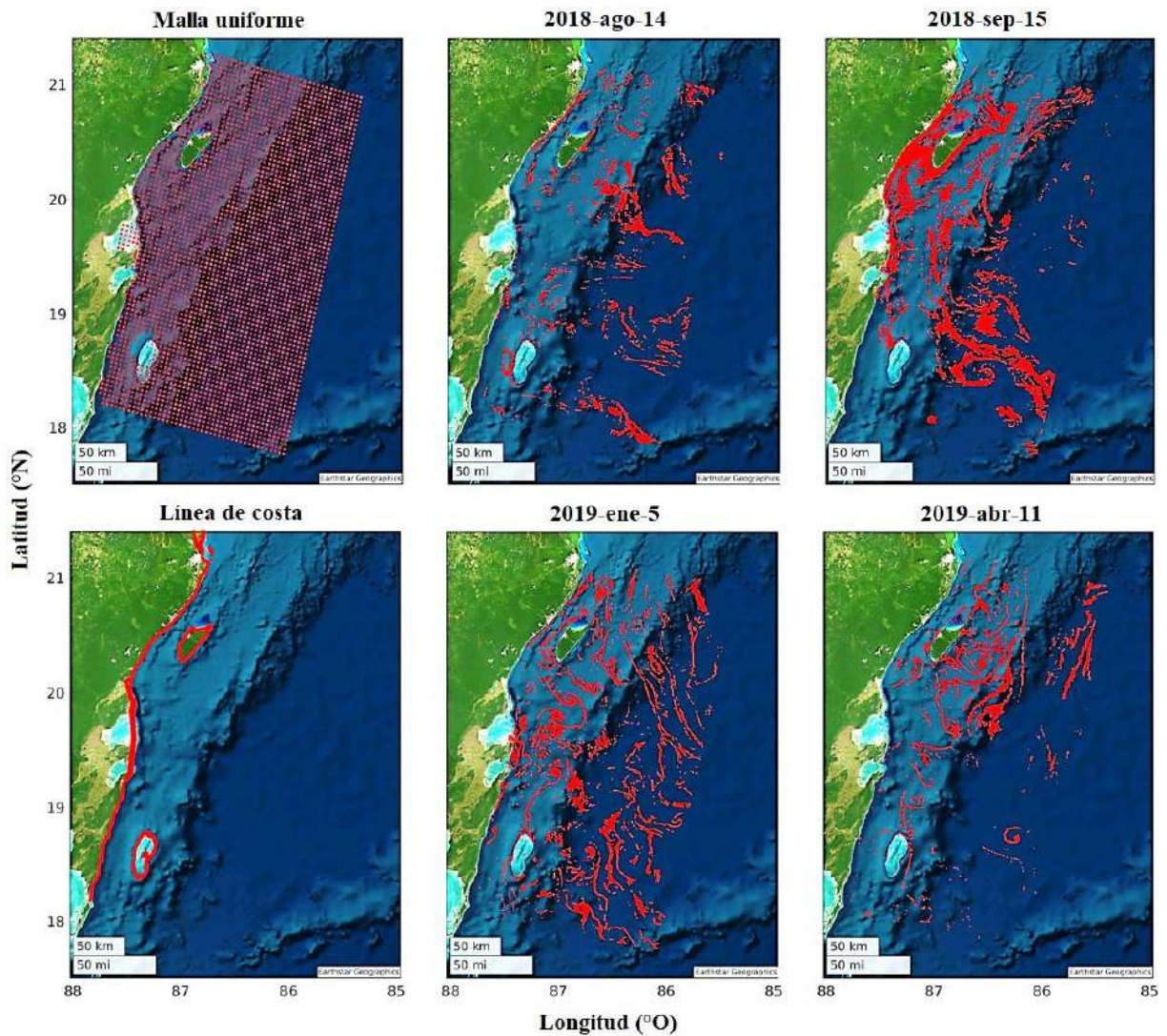


Fig. 9. Opciones automatizadas para la liberación espacial de partículas virtuales: (1) a partir de una malla uniforme (arriba a la izquierda), (2) a partir de la línea de costa (abajo a la izquierda) y (3) a partir de las coordenadas de los píxeles en donde se identificó sargazo con Landsat-8 en fechas particulares (figuras en columnas dos y tres).

4.3.1.2. Tiempo máximo de seguimiento de las partículas virtuales

Los experimentos numéricos sembrando partículas virtuales a lo largo de la línea de costa y siguiéndolas hacia atrás en el tiempo mostraron que estas requieren de ~5 a 10 días para salir del Caribe mexicano. Esto significa que las partículas virtuales que se siembran dentro de aguas del

Caribe mexicano y se rastrean hacia adelante en el tiempo usualmente arriban en las costas de la región, o salen del Caribe mexicano, en menos de 10 días. Por lo tanto, se consideró que para estimar el transporte de sargazo en el Caribe mexicano es suficiente utilizar un tiempo máximo de seguimiento de 10 días.

4.3.1.3. Métodos de interpolación

La interpolación temporal de los campos de velocidad de corrientes y vientos al tiempo de las partículas se realizó mediante interpolación lineal. Con este tipo de interpolación se estimó el valor de las componentes de las velocidades en cualquier tiempo intermedio entre dos valores conocidos, cada uno de los cuales tiene su respectiva coordenada temporal.

La interpolación espacial de los campos de velocidad de corrientes y vientos a la posición de las partículas virtuales se realizó mediante interpolación bilineal, o de vecino más cercano en los casos en los que no había suficientes puntos vecinos para hacer la bilineal. La interpolación bilineal toma en cuenta los valores de los cuatro puntos adyacentes más cercanos a un punto en que se desconoce su valor y utiliza una combinación ponderada de estos valores conocidos para estimar el valor desconocido. Esta combinación ponderada se calcula mediante la interpolación lineal en dos dimensiones, es decir, interpolando primero en una dirección y luego en la otra. Si una partícula virtual se encuentra tan cerca de la costa que no está rodeada por cuatro datos de velocidad, entonces se le atribuye la velocidad del punto vecino más cercano.

4.3.1.4. Paso de tiempo y método Runge-Kutta

La detección satelital del sargazo ocurre en momentos muy específicos (no redondeados) (e.g., a las 16:10:05 o 16:14:10). Por lo tanto, para comparar mejor la distribución de las partículas virtuales con la distribución del sargazo detectado por satélite, se seleccionó un paso de tiempo (dt)

de 1 minuto. La selección de este paso de tiempo también es conveniente para disminuir la frecuencia de arribos poco realistas cuando las partículas virtuales pasan muy cerca de la línea de costa (respecto a la escala espacial del modelo), por ejemplo, a través del canal de Yucatán.

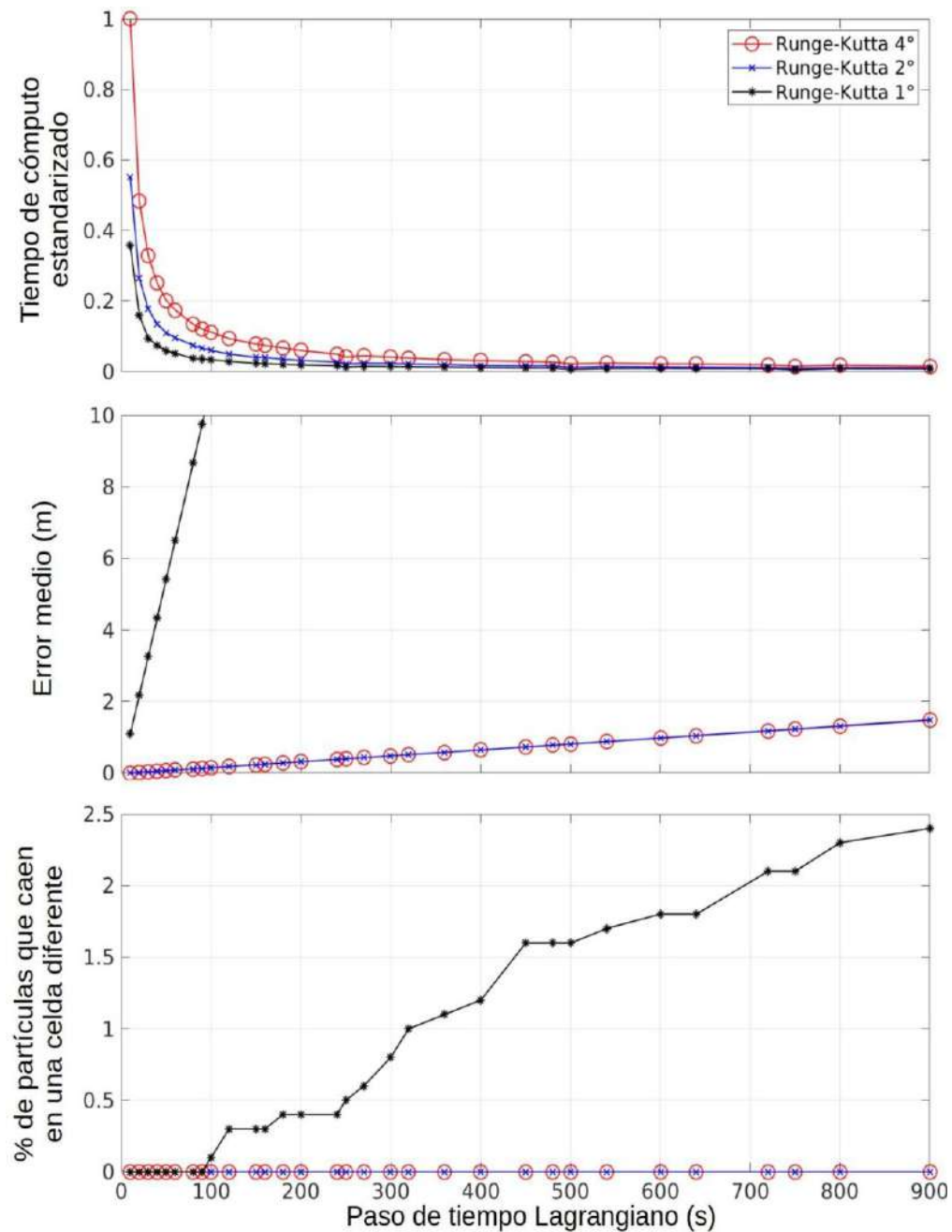


Fig. 10. Tiempo de cómputo y error al simular trayectorias de partículas virtuales por 10 días, en función del paso de tiempo y del orden del método Runge-Kutta. Los distintos resultados son

relativos al que se obtuvo usando un paso de tiempo de 10 s y un Runge-Kutta de 4^{to} orden: se asume que estos valores calculan las trayectorias de forma más precisa.

De acuerdo con los experimentos numéricos para seleccionar el orden del esquema de Runge-Kutta (en función del dt seleccionado y considerando trayectorias de partículas de 10 días) (Fig. 10), el esquema de Runge-Kutta de 1^{er} orden tuvo un error medio de 6.5 m y un tiempo de cálculo 3.4 veces más rápido que el de Runge-Kutta de 4^{to} orden. Se obtuvieron prácticamente las mismas posiciones finales (error medio de 0.02 mm) al usar un Runge-Kutta de 2^{do} orden y uno de 4^{to} orden; sin embargo, el tiempo de cálculo fue 1.8 veces más rápido al usar el Runge-Kutta de 2^{do} orden. Por lo tanto, el esquema de integración elegido para este estudio fue el Runge-Kutta de 2^{do} orden, con lo que el procedimiento para obtener la posición de cada partícula virtual después de cada dt fue el siguiente:

Se obtuvo una velocidad temporal de la partícula (u_{tmp} , v_{tmp}) interpolando las velocidades de las corrientes oceánicas y del viento a la posición inicial (x_0 , y_0) y el tiempo inicial (t_0) de la partícula.

$$u_{tmp}(x_0, t_0) \quad \text{Ec. (1a)}$$

$$v_{tmp}(y_0, t_0) \quad \text{Ec. (1b)}$$

Se calculó una posición temporal de la partícula (x_{tmp} , y_{tmp}) multiplicando la velocidad temporal de la partícula (u_{tmp} , v_{tmp}) por la mitad del dt.

$$x_{tmp} = x_0 + dt/2 * u_{tmp} \quad \text{Ec. (2a)}$$

$$y_{tmp} = y_0 + dt/2 * v_{tmp} \quad \text{Ec. (2b)}$$

La velocidad de la partícula (u_p, v_p) se obtuvo interpolando las velocidades de la corriente oceánica y del viento a la posición temporal (x_{tmp}, y_{tmp}) y al tiempo temporal (t_{tmp}) de la partícula, donde $t_{tmp} = t_0 + dt/2$.

$$u_p(x_{tmp}, t_{tmp}) \quad \text{Ec. (3a)}$$

$$v_p(y_{tmp}, t_{tmp}) \quad \text{Ec. (3b)}$$

La nueva posición de la partícula (x_1, y_1) se calculó multiplicando la velocidad de la partícula (u_p, v_p) por el dt .

$$x_1 = x_0 + dt * u_p \quad \text{Ec. (4a)}$$

$$y_1 = y_0 + dt * v_p \quad \text{Ec. (4b)}$$

4.3.1.5. Modelo de crecimiento

Se encontró que el siguiente modelo lineal mostró un buen ajuste ($CC = 0.97$) entre las tasas de crecimiento (duplicaciones/día) reportadas por Lapointe et al. (2014) y la concentración de clorofila-a (mg/m^3) estimada satelitalmente (producto ESA-CCI; Sección 4.2.3):

$$GR = 0.06 * \text{clorofila-a} + 0.01 \quad \text{Ec. (5)}$$

La Ec. (5) se utilizó para estimar la tasa de crecimiento (GR), expresada en duplicaciones/día, de las partículas virtuales como función de la concentración de clorofila-a, pero la tasa máxima de crecimiento se limitó a 0.093 duplicaciones/día (la cual se obtuvo con concentraciones de clorofila-a $\geq 1.4 \text{ mg}/\text{m}^3$; Ec. 5), que es la tasa de crecimiento máxima reportada en Lapointe et al. (2014). El procedimiento para incorporar crecimiento a las partículas virtuales después de cada dt se definió de la siguiente manera: la concentración de clorofila-a de los datos

satelitales se interpoló a la posición y tiempo (t) de cada partícula virtual, y se asoció una GR según la Ec. (5). Luego, la masa (m) de la partícula virtual se aumentó de acuerdo con la GR asociada:

$$m_{t+dt} = m_t * (1 + GR)^{dt} \quad \text{Ec. (6)}$$

Para más detalles sobre el modelo de crecimiento exponencial, consultar el Apéndice *a*.

4.3.2. Validación de vientos y corrientes

Los vientos derivados de satélites (IFREMER CERSAT) en el Caribe mexicano fueron más parecidos a los vientos de ERA5 (e.g., septiembre 2018: CC = 0.86, RECM = 1.1 m/s) que a los vientos de CFSv2 (e.g., septiembre 2018: CC = 0.81, RECM = 1.2 m/s), durante todos los meses estudiados. El valor de correlación más alto correspondió a enero 2019 (ERA5 CC = 0.96; CFSv2 CC = 0.90). La raíz del error cuadrático medio más baja correspondió a abril 2019 (ERA5 RECM = 0.8 m/s; CFSv2 RECM = 1.2 m/s). Por lo general, el desempeño de cada modelo disminuyó cerca de la costa, y CFSv2 claramente sobreestimó la velocidad del viento costero entre 18.5°N y 21°N (Fig. 11).

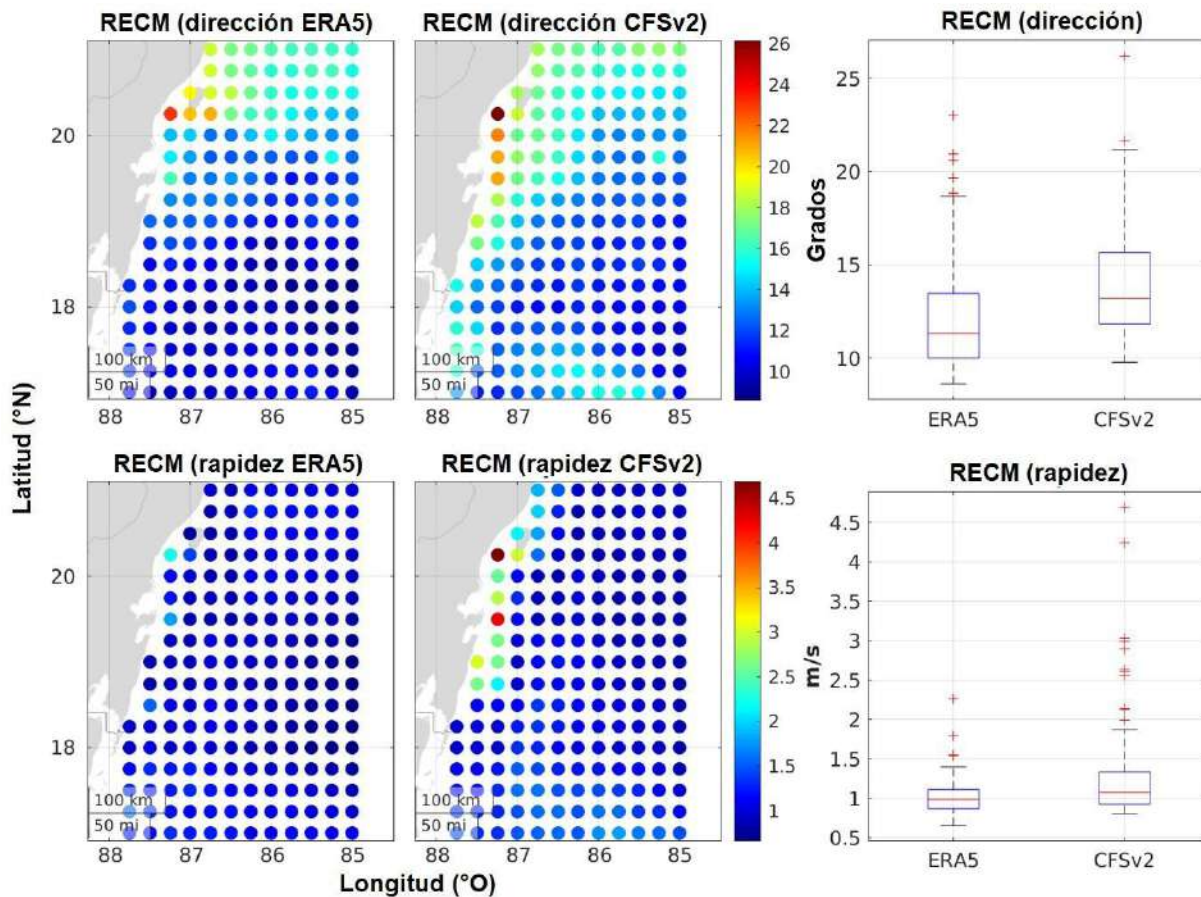


Fig. 11. Comparación de los vientos de los reanálisis ERA5 y CFSv2 con los vientos derivados de satélites (IFREMER CERSAT), para el mes de septiembre de 2018. En los mapas se muestra la raíz del error cuadrático medio (RECM) de la dirección (paneles superiores) y rapidez (paneles inferiores) del viento para cada punto de malla. Los gráficos de caja y bigotes corresponden a los datos de RECM mostrados en los mapas.

Los datos de viento de la estación meteorológica de Puerto Morelos confirmaron un mejor rendimiento de ERA5 (e.g., abril 2019: CC = 0.72; RECM = 1.44 m/s) y una sobreestimación de la velocidad costera por parte de CFSv2 (e.g., abril 2019: CC = 0.66; RECM = 2.83 m/s) (Fig. 12a). Los datos de la estación meteorológica de Punta Herrero mostraron que ambos modelos, particularmente CFSv2, sobreestimaron la velocidad del viento en este sitio. Por ejemplo, en abril

de 2019, la raíz del error cuadrático medio de CFSv2 (RECM = 6.27 m/s) fue 1.98 veces mayor que la de ERA5 (RECM = 3.16 m/s) (Fig. 12b).

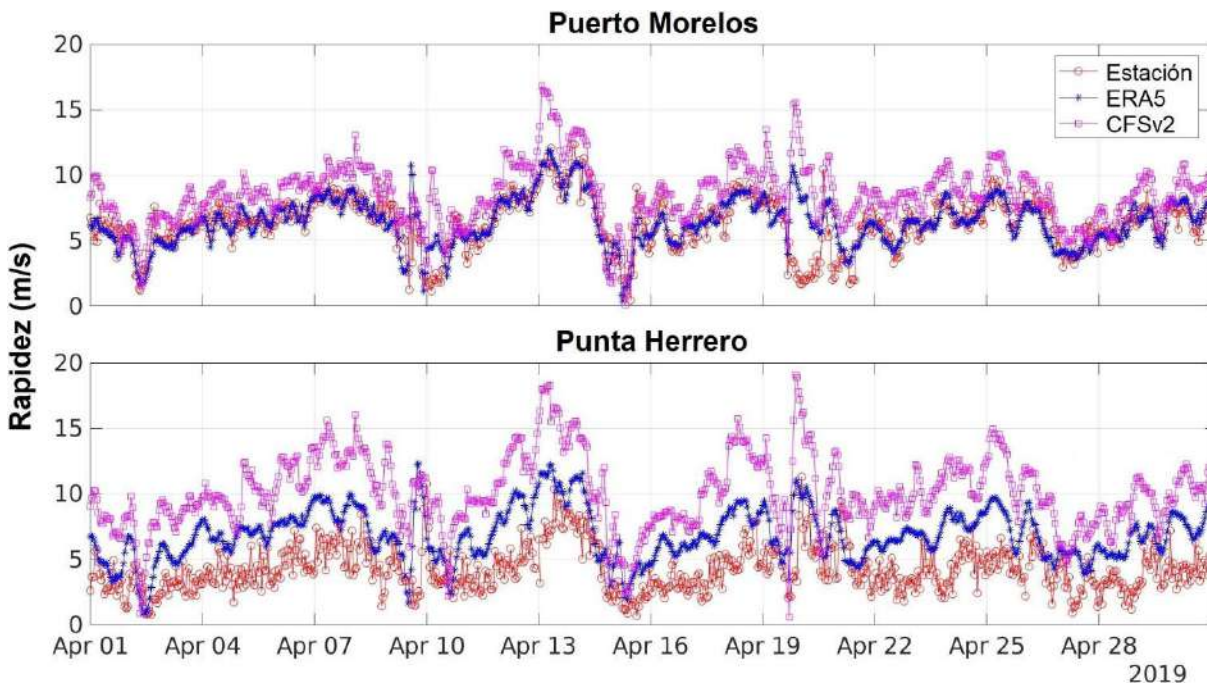


Fig. 12. Series de tiempo de la rapidez del viento en Puerto Morelos (panel superior) y Punta Herrero (panel inferior) durante abril de 2019, de estaciones meteorológicas (línea roja) y de los reanálisis ERA5 (línea azul) y CFSv2 (línea magenta).

Las corrientes oceánicas obtenidas por satélite (OSCAR) en el Caribe mexicano fueron ligeramente más parecidas a las corrientes oceánicas del HYCOM Global (e.g., sep 2018: CC = 0.78, RECM = 0.25 m/s) que a las del HYCOM del Golfo de México (e.g., sep 2018: CC = 0.72, RECM = 0.29 m/s), durante todos los meses estudiados. El coeficiente de correlación más alto correspondió a agosto de 2018 (HYCOM Global CC = 0.89; HYCOM del Golfo de México CC = 0.87). El RECM más bajo correspondió a enero de 2019 (HYCOM Global RECM = 0.19 m/s; HYCOM del Golfo de México RECM = 0.24 m/s) (Fig. 13).

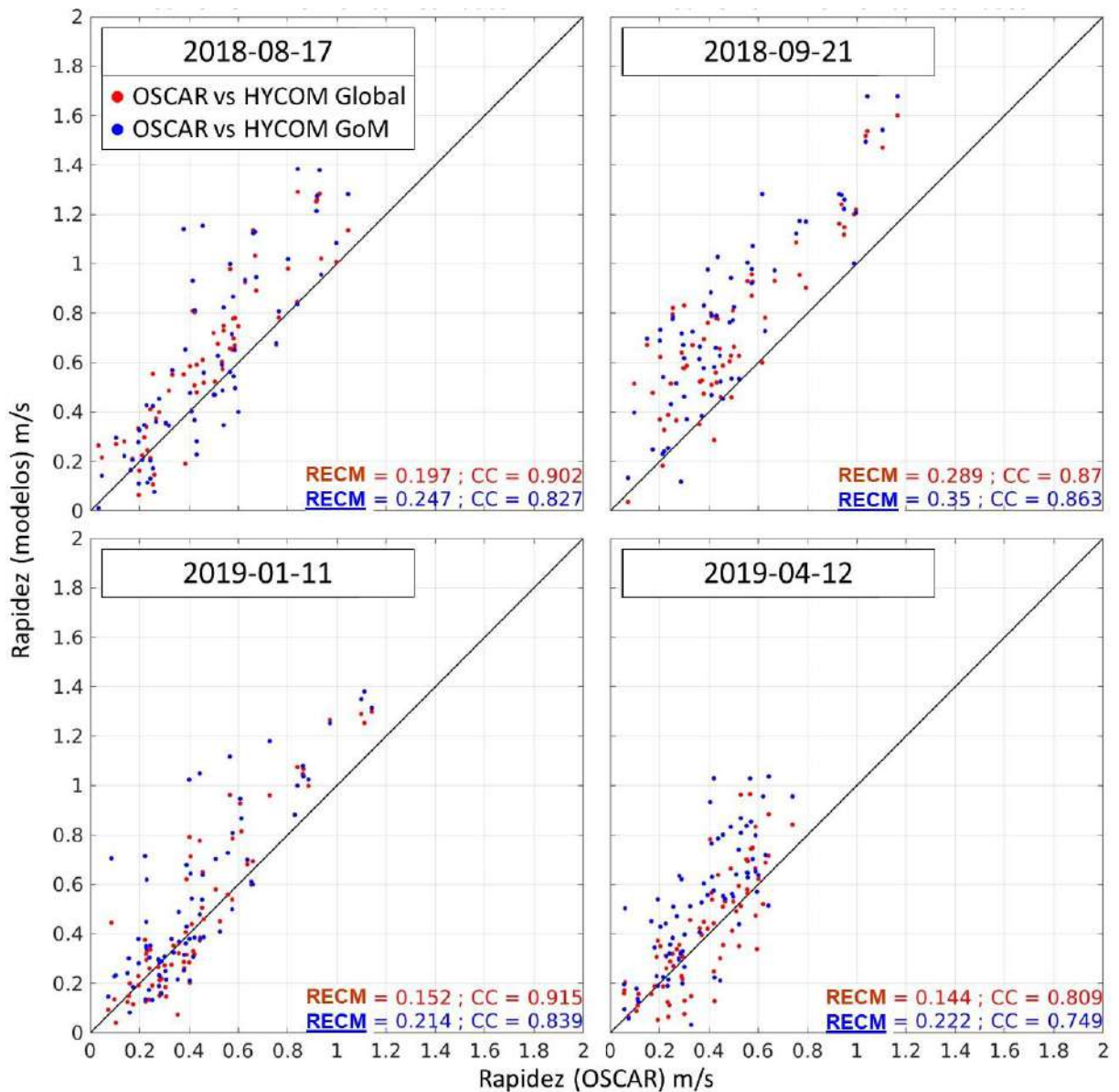


Fig. 13. Diagramas de dispersión para comparar la rapidez de las corrientes medidas satelitalmente (OSCAR) con la rapidez de las corrientes según los experimentos numéricos del HYCOM Global y del HYCOM del Golfo de México. Se muestran comparaciones para cuatro días, en donde cada punto del gráfico corresponde a una celda de malla dentro del dominio analizado. RECM: Raíz del Error Cuadrático Medio. CC: Coeficiente de Correlación.

4.4. Discusión

El sistema Lagrangiano aquí desarrollado, en comparación con otros sistemas existentes, aportó una serie de ventajas, principalmente, la de haber sido diseñado específicamente para estudiar dinámicas de transporte de sargazo en el Caribe mexicano. En consecuencia, el código es más eficiente y fácil de entender, implementar y modificar. Esto es debido a que sólo incluye las características necesarias para modelar transporte de sargazo en la región, descartando a las que se usarían para simular la dispersión de entidades diferentes como peces o petróleo. Por ejemplo, el sistema Lagrangiano Ichthyop (Lett et al., 2008) incluye módulos para simular desoves, migraciones, reclutamiento, y otros procesos físico-biológicos que no son indispensables (ni útiles) para simular transporte de sargazo en el Caribe mexicano.

El sistema Lagrangiano también tiene ventajas por estar escrito en Matlab®, un lenguaje de programación muy bien documentado, con muchas funcionalidades y de alto nivel, lo cual contribuye con la fácil lectura y comprensión del código por parte del usuario (<https://www.mathworks.com/>). El uso de Matlab® ayudó a generar un algoritmo menos extenso y complejo, en comparación con el de otros sistemas Lagrangianos, como el de Ichthyop (Lett et al., 2008) o el incluido en HYCOM (Halliwell et al., 2003). Además, Matlab® es altamente eficiente para trabajar con datos organizados en matrices (e.g., datos de imágenes satelitales y de modelos numéricos), y se ha demostrado que algoritmos Lagrangianos escritos en Matlab® pueden ser más rápidos que los escritos en otros lenguajes de alto rendimiento (Anguiano et al., 2019). Aunque Matlab® es un software comercial, es común que la comunidad científica tenga acceso a una licencia financiada por sus instituciones. Otros algoritmos Lagrangianos, aunque gratuitos, no facilitan la visualización ni modificación de su código (e.g., ARIANE; Blanke y Raynaud, 1997).

4.4.1. Posición inicial de las partículas virtuales

La automatización de la liberación de las partículas virtuales a lo largo de la línea de costa es muy útil para ejecutar experimentos hacia atrás en el tiempo, los cuales pueden ayudar a determinar de dónde viene el sargazo que arriba en el Caribe mexicano. Por otro lado, la liberación de partículas virtuales uniformemente distribuidas en el Caribe mexicano es particularmente útil para ejecutar experimentos hacia adelante en el tiempo, con los cuales se puede estimar a dónde iría el sargazo si estuviera en determinadas regiones del Caribe mexicano. Es decir, se evalúa un escenario hipotético en donde no está confirmada la presencia de sargazo. La otra forma de liberación de partículas virtuales considerada en este estudio, i.e., a partir de datos satelitales de la distribución de sargazo, permite estimar cuál es el sitio de origen y/o destino de balsas reales de sargazo detectadas en el Caribe mexicano. Lo anterior permite responder preguntas que usualmente se atienden al usar modelos Lagrangianos (e.g., Lara-Hernández, 2012; Franks et al., 2016; Kwon et al., 2019; Lara-Hernández et al., 2019; Gargano et al., 2022).

La detección satelital de sargazo se realizó usando imágenes de Landsat-8 y el método de discriminación de sargazo de Cuevas et al. (2018) y Uribe-Martínez et al. (2022). Esta detección ofrece una mayor resolución (píxeles de 30x30 m) y precisión (enfoque multi-índice) en comparación con otros métodos de identificación satelital de sargazo. Por ejemplo, Brooks et al. (2018) utilizaron sólo un índice, el índice de máxima clorofila, a partir de un compuesto (píxeles de 5x5 km) que se derivó de imágenes de MERIS. Dicho índice no es específico para sargazo, por lo que niveles altos y bajos del índice no garantizan la presencia o ausencia de sargazo. Sembrar partículas a partir de detecciones de sargazo precisas y de alta resolución es muy importante para poder generar estimaciones realistas de transporte y arribo de sargazo (Cuevas et al., 2018; Uribe-Martínez et al., 2022).

4.4.2. Tiempo máximo de seguimiento de las partículas virtuales

Se encontró apropiado un tiempo de rastreo de 10 días como máximo, ya que es tiempo suficiente para que las partículas virtuales sembradas en aguas del Caribe mexicano arriben a las costas de la región, o salgan del dominio analizado (e.g., hacia el interior del Golfo de México). Diez días es un tiempo de viaje corto que contribuye a la simplificación de modelos de seguimiento de sargazo en el Caribe mexicano, pues el efecto de algunos procesos como crecimiento, mortalidad e inercia adquiere relevancia cuando se modelan escalas temporales mayores (Brooks et al., 2018, 2019). Brooks et al. (2018) sugieren que considerar crecimiento y mortalidad adquiere relevancia para estimar mejor la distribución de sargazo cuando se modelan periodos de dos meses o más. Brooks et al. (2019) también indican que el efecto de la inercia sobre el transporte es más evidente cuando el sargazo lleva más tiempo de viaje.

4.4.3. Métodos de interpolación

En cuanto a la interpolación temporal de los campos de velocidad a los tiempos de las partículas virtuales, la interpolación lineal resultó computacionalmente eficiente, fácil de implementar y rápida de calcular, especialmente porque se involucran muchos datos. Aunque la interpolación lineal puede no ser la técnica más precisa disponible, en muchos casos resulta ser la mejor opción (Stohl et al., 1995; Pownuk y Kreinovich, 2017). En el caso de este estudio, para el manejo adecuado de la problemática que impone el arribo del sargazo, es más importante tener resultados de predicciones en menor tiempo que tener precisión detallada en la interpolación de velocidades. Por otro lado, los campos de velocidad se usaron con su máxima resolución temporal (datos de viento de cada hora y datos de corrientes de cada 3 horas), por lo tanto, las velocidades que se

interpolan a las partículas virtuales logran representar (con la mejor resolución disponible) la variabilidad de corrientes y de vientos que ocurre en el transcurso de cada día.

En cuanto a la interpolación espacial de los campos de velocidad a las posiciones de las partículas virtuales, se usó la interpolación bilineal, la cual es computacionalmente eficiente y requiere de cuatro puntos de datos de velocidad que circunden a la partícula virtual (Bovik, 2009). La interpolación bilineal no funciona muy cerca de la línea de costa, cuando ya no se tienen valores de corrientes en los cuatro puntos circundantes a la posición de alguna partícula virtual; y esto es especialmente problemático en el Canal de Yucatán, pues queda muy estrecha la región efectiva por la cual pueden fluir las partículas virtuales, aumentando el número de arribos. La opción para aminorar este problema fue usar interpolación de vecino más cercano cuando no existieron los puntos vecinos necesarios para realizar la interpolación bilineal; de esta manera, las partículas virtuales ganan terreno para fluir más cerca de la línea de costa, ensanchándose el espacio a través del Canal de Yucatán. La interpolación de vecino más cercano (usada sólo cuando las partículas se encontraron muy cerca de la línea de costa) es incluso más simple y computacionalmente económica que la bilineal, aunque puede producir resultados menos precisos y suavizados (Bovik, 2009). En el código de seguimiento de partículas de HYCOM (Halliwell et al., 2003) también se considera conveniente hacer interpolaciones de vecino más cercano cuando no hay suficientes puntos vecinos que permitan hacer interpolaciones de orden superior.

4.4.4. Paso de tiempo y método Runge-Kutta

La selección del paso de tiempo Lagrangiano de 1 min estuvo condicionada para que se pudieran obtener resultados del modelo que coincidieran en tiempo con los datos de otras fuentes (e.g., detección satelital), y para evitar un exceso de arribo de partículas virtuales, especialmente en la

región del canal de Cozumel. Para estas regiones complejas asociadas a fronteras, los pasos de tiempo pequeños resultan ventajosos (Shah et al., 2013). El paso de tiempo de 1 min es mucho menor que el empleado en otros estudios, e.g., 15-30 min (Franks et al., 2016; Putman et al., 2018, 2020), y lo suficientemente pequeño como para que los Runge-Kutta de 2^{do} y 4^{to} orden generen resultados con prácticamente la misma precisión (los Runge-Kutta de menor orden mejoran al disminuir el paso de tiempo; Biswas et al., 2013). No obstante, el Runge-Kutta de 2^{do} orden fue casi dos veces más rápido que el de 4^{to} orden, y obtuvo resultados similares, por lo que se consideró más adecuado para este estudio. Consistentes con este resultado, Mazumdar y Guthrie (1988) informan que el Runge-Kutta de 2^{do} orden puede producir trayectorias equivalentes a las de los métodos de orden superior, siendo más eficiente desde el punto de vista computacional.

4.4.5. Modelo de crecimiento

La tasa de crecimiento de sargazo expresada como “duplicaciones/día” (e.g., Ec. 5) también se puede expresar como “tiempo de duplicación” (e.g., Magaña-Gallegos et al. 2023a, 2023b), el cual se refiere al tiempo tras el cual la biomasa se habrá duplicado siguiendo un crecimiento exponencial; este proporciona una idea más intuitiva de que tan rápido crece el sargazo. Las duplicaciones por día (dpd) se pueden convertir de forma equivalente a tiempo de duplicación (td) mediante la siguiente ecuación, cuya derivación y comprobación se pueden consultar en el Apéndice a.

$$td = \ln(2) / \ln(1+dpd) \quad \text{Ec. (7)}$$

Según el modelo de crecimiento desarrollado en este trabajo –estimación del crecimiento en función de tasas de crecimiento reportadas por Lapointe et al. (2014) y del estado trófico del agua de mar (inferido por la concentración de clorofila-a)–, el tiempo de duplicación de la “masa”

de las partículas virtuales en Puerto Morelos sería de entre 9 días (en abril de 2019) y 18 días (en enero de 2019). Estas estimaciones son consistentes con los tiempos de duplicación de sargazo cultivado en aguas neríticas (mesotróficas) de Puerto Morelos (Magaña-Gallegos et al., 2023a, 2023b) (Tabla I), las cuales se esperaba que generalmente presentaran más nutrientes que las aguas del mar abierto en la región (Condal et al., 2013; Pérez-Gómez et al., 2020). En algunos sitios de la zona nerítica del Caribe mexicano se estimaron tasas de crecimiento máximas de una duplicación en 7 días, lo cual es muy parecido a las tasas de crecimiento máximas reportadas para el sargazo en aguas neríticas de distintas partes del mundo (Lapointe et al., 2014; Changeux et al., 2023; Corbin y Oxenford, 2023), incluido el Caribe mexicano (Magaña-Gallegos et al., 2023a, 2023b).

En el mar abierto del Caribe mexicano, el modelo estimó que la “masa” de las partículas virtuales se duplicaría tras un periodo de entre ~26 y 38 días, dependiendo de la cercanía a la costa (mayor crecimiento en aguas más cercanas a la costa) y del mes de estudio (mayor crecimiento en enero de 2019). Estos tiempos de duplicación son similares a los reportados para *S. fluitans* III (32 días) y *S. natans* I (29 días) en aguas oceánicas cercanas a Bahamas (Lapointe, 1986), y son más rápidos que los medidos cerca de Bermuda, en el Mar de los Sargazos (duplicación entre 50 y 200 días) (Lapointe et al., 2014). El Mar de los Sargazos se caracteriza por sus aguas ultra-oligotróficas (Leonelli et al., 2022), aunque el mar abierto del Caribe mexicano también es altamente oligotrófico (Condal et al., 2013) (Fig. 2). La temperatura de la superficie marina en el Mar de los Sargazos, cerca de Bermuda, ha mostrado una tendencia al alza desde 1980, y desde 2015 ha oscilado entre los 20°C y 28°C (Bates y Johnson, 2020), el cual constituye un intervalo de temperatura óptimo para el crecimiento del sargazo (Hanisak y Samuel, 1987). En el Caribe mexicano, la temperatura de la superficie marina típicamente oscila entre los 22°C y 31°C (Magaña-Gallegos et al., 2023b), y el sargazo generalmente disminuye su crecimiento por encima

de los 30°C (Hanisak y Samuel, 1987; Magaña-Gallegos et al., 2023b); dicha posible disminución en el crecimiento por temperaturas altas podría presentarse en el Caribe mexicano, pero no fue considerada en el modelo.

Aún no se cuentan con mediciones *in situ* de tasas de crecimiento de sargazo en distintas zonas del mar abierto del Caribe Mexicano, pero serían muy útiles para calibrar y validar modelos de crecimiento específicos para la región. A medida que se genere nueva información sobre la fisiología del sargazo en el Caribe mexicano, se podrán desarrollar modelos biológicos más precisos y/o complejos, aunque los modelos más simples podrían ser suficientes y más valiosos para que los sistemas de pronóstico emitan alertas en el menor tiempo posible. Por ejemplo, Marsh et al. (2021) consideraron un modelo de mortalidad de sargazo en función de la temperatura marina, pero un modelo así resulta innecesario para el Caribe mexicano pues temperaturas letales para el sargazo (<14°C o >40°C; Hanisak y Samuel, 1987; Jouanno et al., 2021) no suelen ocurrir en dicha región (Magaña-Gallegos et al., 2023b).

4.4.6. Validación de vientos y corrientes

En concordancia con los resultados de este trabajo, se ha informado que los vientos del reanálisis ERA5 son más realistas que los vientos de otros reanálisis, incluyendo CFSv2 (Graham et al., 2019; Ramon et al., 2019; Sharmar y Markina, 2020). Por lo tanto, se consideró que ERA5 fue la fuente de datos de viento más realista en este estudio. De igual manera, otros estudios también han reportado que los datos de corriente del HYCOM Global producen trayectorias de deriva más realistas que los datos del HYCOM del Golfo de México (Liu et al., 2014). Además, usar los datos del HYCOM Global, cuya resolución es menor que la del HYCOM del Golfo de México, es computacionalmente menos costoso pues implica manejar un menor número de datos. Por lo tanto,

en este estudio, el HYCOM Global fue considerado la fuente de datos de corrientes oceánicas más adecuada.

La resolución de los modelos considerados aquí, en particular la de los modelos oceánicos (tamaño de celda de 4-9 km²), no permite la representación de características de menor escala como pequeños remolinos o una geomorfología costera precisa, los cuales son particularmente importantes en procesos costeros (e.g., en procesos de arribo) (Dauhajre et al., 2019; Rutten et al., 2021). Por lo tanto, los estimados de transporte y arribo del algoritmo Lagrangiano acoplado a estos datos oceánicos no deben asociarse con puntos geográficos específicos, sino más bien con rangos de incertidumbre espacial de al menos el tamaño de la celda de la cuadrícula. Considerar rangos de incertidumbre espacial más grandes a lo largo de la costa permitiría proporcionar estimados de arribo más confiables. En este estudio, se proporcionan estimados de arribo para toda la extensión de la costa del Caribe mexicano, desde ~18°N hasta ~21.5°N (~400 km), y para intervalos espaciales de 0.25 grados (~30 km).

4.5. Conclusión

Se construyó un sistema Lagrangiano en 2D, con el fin de simular transporte de sargazo en el Caribe mexicano. El sistema puede calcular trayectorias hacia adelante o hacia atrás en el tiempo, para lo cual usa datos de corrientes (con resolución temporal de 3 h) del HYCOM Global o del HYCOM del Golfo de México, así como datos de vientos (con resolución temporal de 1 h) de los reanálisis ERA5 o CFSv2. Las corrientes utilizadas para adveccionar partículas virtuales pueden ser superficiales (0 m) o el promedio vertical de las corrientes de 0-5 m. La dirección de los vientos y un porcentaje de su velocidad (determinado por el factor de viento) se utilizan para ejercer un efecto de arrastre directo sobre las partículas virtuales. Además, se incluyó un modelo sencillo de crecimiento como función tanto de tasas de crecimiento de sargazo reportadas por Lapointe et al.

(2014) como del estado trófico del agua marina –inferido por la concentración de clorofila-a detectada satelitalmente–. Las partículas virtuales pueden ser sembradas en coordenadas y tiempos idealizados, o a partir de datos de imágenes de Landsat-8 procesadas con una metodología particularmente efectiva para discriminar sargazo en la región (Cuevas et al., 2018; Uribe-Martínez et al., 2022). El sistema se diseñó para ser más eficiente, fácil de entender, implementar y modificar, en comparación con otros sistemas Lagrangianos.

5° capítulo – Análisis de sensibilidad: cambio en el porcentaje de arribo debido a cambios en parámetros del modelo

5.1. Introducción

Los análisis de sensibilidad permiten examinar cómo los cambios en factores de entrada de un modelo afectan los resultados o salidas de este. El proceso de realizar un análisis de sensibilidad implica variar, dentro de un rango determinado, uno o más parámetros de entrada y luego cuantificar los cambios observados en la salida. Esto ayuda a identificar qué entradas son más influyentes para determinar el resultado, así como el impacto de las incertidumbres asociadas con las entradas (Pianosi et al., 2016). Por lo general, los análisis de sensibilidad relacionados con el transporte de sargazo se han enfocado a escalas de grandes regiones oceánicas, a lo largo de la cuenca del noratlántico (Putman et al., 2018; Brooks et al., 2018, 2019; Berline et al., 2020; Johns et al., 2020; Skliris et al., 2022). Sin embargo, los distintos procesos involucrados en el transporte de sargazo pueden adquirir mayor o menor relevancia, dependiendo de los objetivos de estudio y de la escala espaciotemporal que se considere. El objetivo que corresponde a este capítulo fue analizar la sensibilidad de modelos Lagrangianos que usan datos de libre acceso de vientos y corrientes marinas para estimar la dinámica del transporte de sargazo en el Caribe mexicano.

A continuación, se mencionan algunas publicaciones en donde se han realizado análisis de sensibilidad para estudiar dinámicas de transporte de sargazo.

Brooks et al. (2018) estudiaron factores que controlan la distribución de sargazo en grandes regiones oceánicas, y encontraron que, para escalas temporales cortas (menores a dos meses), la advección por corrientes es el principal determinante de la distribución. No obstante, para escalas

temporales mayores, ellos necesitaron incorporar aspectos fisiológicos como reproducción, crecimiento y mortalidad, los cuales reportan fuertemente dependientes de la disponibilidad de nutrientes. Sólo añadiendo dichos aspectos fisiológicos al modelo, Brooks et al. (2018) lograron reproducir la distribución estacional observada del sargazo en el noratlántico.

Putman et al. (2018) reportan que el transporte de sargazo es muy sensible al efecto de arrastre que ejerce el viento (*windage*) directamente sobre la macroalga. Por ejemplo, al considerar la influencia del viento, con un factor de viento de 1%, el sargazo en el Atlántico Ecuatorial adquirió mayor probabilidad de llegar al oeste del Mar Caribe. Putman et al. (2018) también encontraron que el transporte de sargazo está muy ligado al Sistema de la Corriente del Norte de Brasil, pues este puede definir el flujo de sargazo hacia el Mar Caribe o hacia el Atlántico ecuatorial.

Brooks et al. (2019) sugieren que la inercia es otro factor que afecta el transporte de sargazo; por ejemplo, efectos inerciales parecen favorecer más retención de sargazo en el Golfo de México y Mar Caribe, así como un mayor flujo de sargazo desde el Mar de los Sargazos hacia el Mar Caribe. Este puede ser un mecanismo clave para explicar la persistencia de la población de sargazo en el Golfo de México, Mar de los Sargazos y Mar Caribe. Dado que la inercia provoca pequeñas desviaciones que se van acumulando a lo largo de las trayectorias del sargazo, considerar la inercia en los modelos numéricos va adquiriendo mayor relevancia conforme se estudian escalas espaciotemporales mayores.

Putman et al. (2020) evaluaron con más detalle que considerar el factor de viento produce trayectorias más realistas del sargazo en el norte del Mar Caribe, y encontraron que factores de viento de 1% a 3% pueden mejorar las predicciones de transporte de sargazo en dicha región. Putman et al. (2020) mencionan que el valor del factor de viento más realista depende de la región

de estudio, así como de las fuentes de datos de vientos y de corrientes que se utilicen. Por lo tanto, identificar y corregir debilidades en la representación de vientos y corrientes es parte fundamental para mejorar las predicciones del transporte de sargazo.

Berline et al. (2020) también analizaron el efecto en el arrastre de sargazo debido al viento, y encontraron que factores de viento de 0.5% a 2% mejoran las predicciones de transporte de sargazo en el noratlántico tropical. Además, destacan que la advección por corrientes y vientos tiene un papel predominante en el ciclo anual de la distribución de sargazo. Por ejemplo, se sugiere que la acumulación de sargazo en el oeste de África se explica por el frenado de la Contracorriente NorEcuatorial y por la ocurrencia de corrientes convergentes que favorecen la retención. Asimismo, la acumulación de sargazo al este de Brasil está influenciada por la dinámica del sistema de corrientes al norte de Brasil, aunque el crecimiento local parece ser más relevante en esta región.

Jonhs et al. (2020) y Skliris et al. (2022) sugieren que la abundancia de sargazo es muy dependiente de los patrones de corrientes y vientos, pues estos modulan la disponibilidad de nutrientes, así como la retención y dispersión del sargazo. Por ejemplo, cuando la zona de convergencia intertropical migra más hacia el sur, se favorece transporte de sargazo hacia las regiones de surgencia ecuatorial y de la pluma del río Amazonas, las cuales son más ricas en nutrientes. Asimismo, mencionan que la intensificación en los vientos puede inducir mezcla y surgencias (e.g., surgencia costera del oeste de África y surgencias ecuatoriales), las cuales llevan nutrientes a la superficie marina, favoreciendo la proliferación de sargazo.

Bernard et al. (2022) analizaron procesos de transporte para predecir el arribo de sargazo a las Antillas menores. Para forzar a su modelo Lagrangiano, usaron datos de viento del reanálisis ERA5, y datos de corrientes de los modelos Mercator o HYCOM Global. Encontraron que los

picos de arribo de sargazo se asocian a regímenes de corrientes característicos, y que las corrientes del modelo HYCOM permiten generar mejores estimaciones del transporte de sargazo.

5.2. Métodos

Los análisis de sensibilidad se realizaron usando el sistema Lagrangiano desarrollado en el Capítulo 4, y consistieron en cuantificar el cambio que se produce en el porcentaje de las partículas virtuales arribadas en el Caribe mexicano cuando cambian siete factores del modelo (Fig. 14).

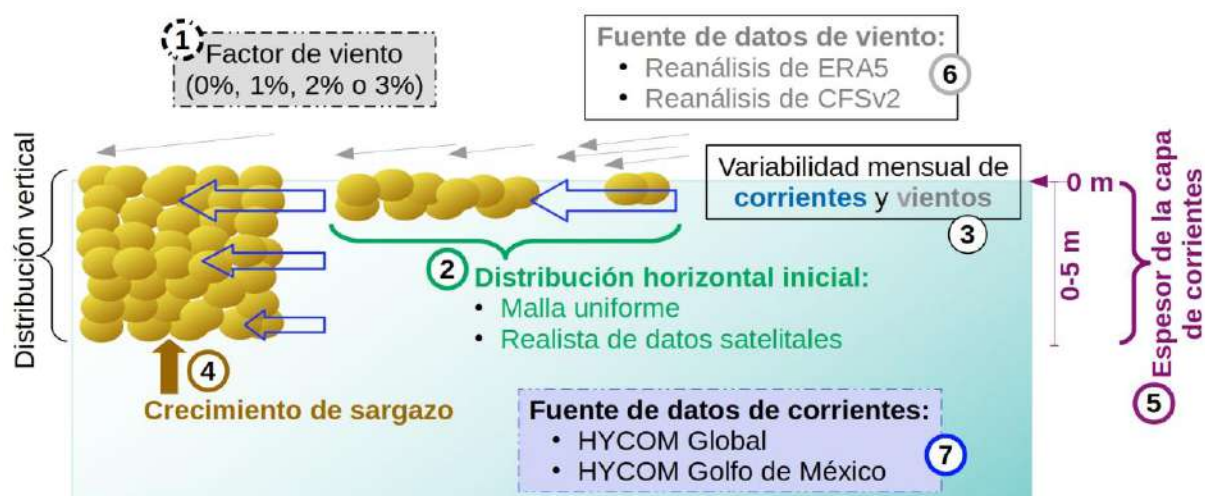


Fig. 14. Representación gráfica de los 7 factores del modelo relacionados con el transporte y arribo del sargazo que se consideraron en los análisis de sensibilidad.

En una primera etapa, se evaluaron los siguientes factores y sus posibles opciones: (a) fuente de datos de viento: ERA5 o CFSv2, (b) fuente de datos oceánicos: HYCOM Global o HYCOM del Golfo de México; (c) factor de viento: 0%, 1%, 2% o 3% de la velocidad del viento; (d) espesor de la capa de corrientes: corrientes de 0 m vs promedio de las corrientes entre 0 m y 5 m; y (e) variabilidad mensual de corrientes y vientos. Los primeros cuatro factores, con sus diferentes opciones, se combinan de 32 maneras diferentes (Fig. 15); por lo tanto, se probaron 32 configuraciones del modelo para cada uno de los cuatro meses analizados. Las pruebas de

sensibilidad se realizaron rastreando partículas virtuales hacia adelante en el tiempo durante un máximo de 10 días. Las partículas virtuales se liberaron en cada vértice de la malla uniforme en el Caribe mexicano (3267 vértices) (Fig. 9) durante los primeros 30 días de cada uno de los meses estudiados: agosto y septiembre de 2018 y enero y abril de 2019. En total, se realizaron 3840 simulaciones (32 configuraciones de modelos * 4 meses * 30 días de liberación por mes) y se rastrearon 12,545,280 partículas virtuales. El cambio promedio en el porcentaje de arribo resultante de las diferentes opciones de factores se calculó a partir de todas las simulaciones. Un 100% de arribo indica que las 3267 partículas virtuales liberadas arribaron al Caribe mexicano.

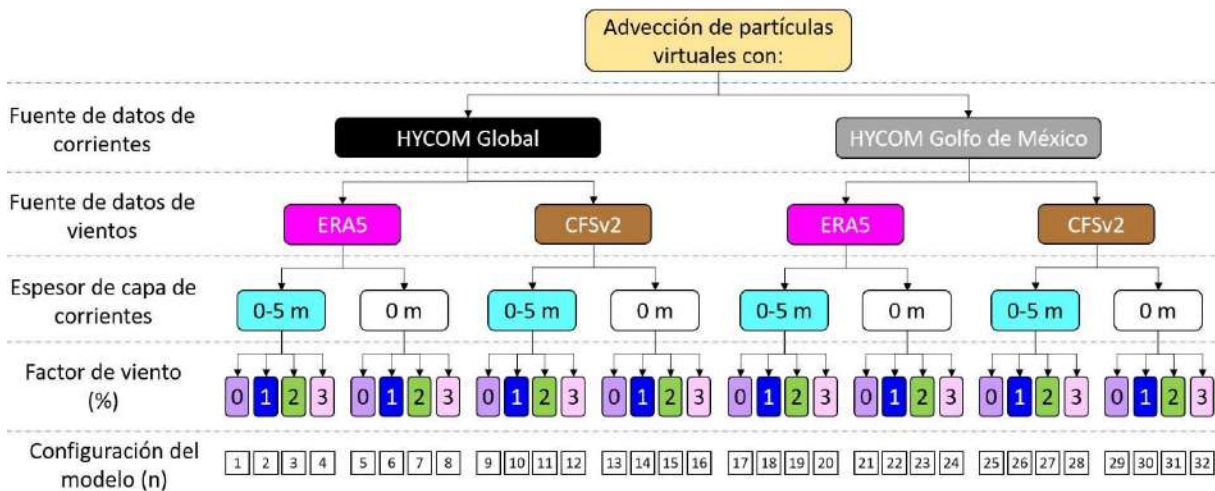


Fig. 15. Combinaciones de los cuatro factores del modelo considerados en la primera etapa del análisis de sensibilidad: (1) fuente de datos de corrientes, (2) fuente de datos de vientos, (3) espesor de la capa de corrientes y (4) factor de viento. A partir de la combinación de estos factores se obtienen las 32 configuraciones del modelo con las que se advectaron a las partículas virtuales.

La segunda etapa de las pruebas de sensibilidad tuvo como fin cuantificar el efecto del crecimiento y de la distribución horizontal de las partículas virtuales en el porcentaje estimado de arribo. Para estas pruebas, se utilizaron los factores de entrada seleccionados como el conjunto de opciones "más realistas" (Tabla II). Para las simulaciones en donde se evaluó el efecto del

crecimiento, las partículas virtuales se sembraron durante los primeros 30 días de cada uno de los 4 meses estudiados, en los vértices de la malla uniforme dentro del Caribe mexicano. Cada partícula virtual se rastreó hacia adelante durante un máximo de 10 días, y el crecimiento se consideró de acuerdo con las ecuaciones (5) y (6) (capítulo 4). Por lo tanto, se ejecutaron 360 simulaciones adicionales (4 meses * 30 días de liberación por mes * 3 factores de viento), con un total de 1,176,120 partículas virtuales adicionales. El porcentaje de partículas virtuales arribadas que se obtuvo de estas simulaciones se comparó con el porcentaje obtenido cuando las partículas virtuales se rastrearon sin crecimiento. Para probar el efecto de la distribución horizontal de las partículas virtuales, estas se sembraron de acuerdo con la distribución de sargazo observada satelitalmente dentro del Caribe mexicano, los días 14 de agosto de 2018, 15 de septiembre de 2018, 5 de enero de 2019 y 11 de abril de 2019. Las partículas virtuales se rastrearon hacia adelante en el tiempo por un máximo de 10 días; así, se ejecutaron 12 simulaciones adicionales (4 meses * 1 día de liberación por mes * 3 factores de viento). El porcentaje de partículas virtuales arribadas que se obtuvo de estas simulaciones se comparó con el porcentaje obtenido cuando las partículas virtuales se liberaron en los vértices de la malla uniforme dentro del Caribe mexicano.

Tabla II. Opciones de factores del modelo consideradas más realistas en este estudio.

Factores	Opciones más realistas	Razón
Factor de viento	1%, 2% y 3% de la rapidez del viento	Estos valores se reportan más comúnmente como válidos (e.g., Putman et al., 2020).
Espesor de la capa de corrientes	0 m	Las balsas de sargazo detectadas por satélite ocurren con más frecuencia en los primeros 50 cm de la superficie del océano (Ody et al., 2019).
Fuente de datos de corrientes	HYCOM Global	Los datos de HYCOM Global tuvieron un mejor ajuste con las corrientes observadas que el que tuvieron los datos del HYCOM del Golfo de México (Sección 4.3.2).
Fuente de datos de viento	Reanálisis ERA5	Los datos de ERA5 tuvieron un mejor ajuste con los vientos observados que el que tuvieron los datos de CFSv2 (Sección 4.3.2).

5.3. Resultados

Las estimaciones del porcentaje de arribo de partículas virtuales a lo largo de la costa del Caribe mexicano en las fechas estudiadas, según diferentes configuraciones de modelos, mostraron el mismo patrón general (Fig. 16) para todos los meses analizados (Fig. 17, Fig. 18). El factor, cuyos cambios tuvieron una mayor influencia sobre la estimación del porcentaje de arribo fue el factor de viento (1^{er} lugar), seguido de la distribución inicial horizontal de las partículas virtuales (2^{do} lugar), y de la variabilidad mensual de las corrientes y vientos (3^{er} lugar). Considerar crecimiento de partículas virtuales (5^{to} lugar) y un distinto espesor de la capa de corrientes (5^{to} lugar) tuvieron un efecto muy parecido y relativamente bajo sobre el porcentaje de arribo. Los factores que menos afectaron el porcentaje de arribo fueron la fuente de datos de viento (6^{to} lugar) y la fuente de datos de corrientes oceánicas (7^{mo} lugar) (Fig. 16).

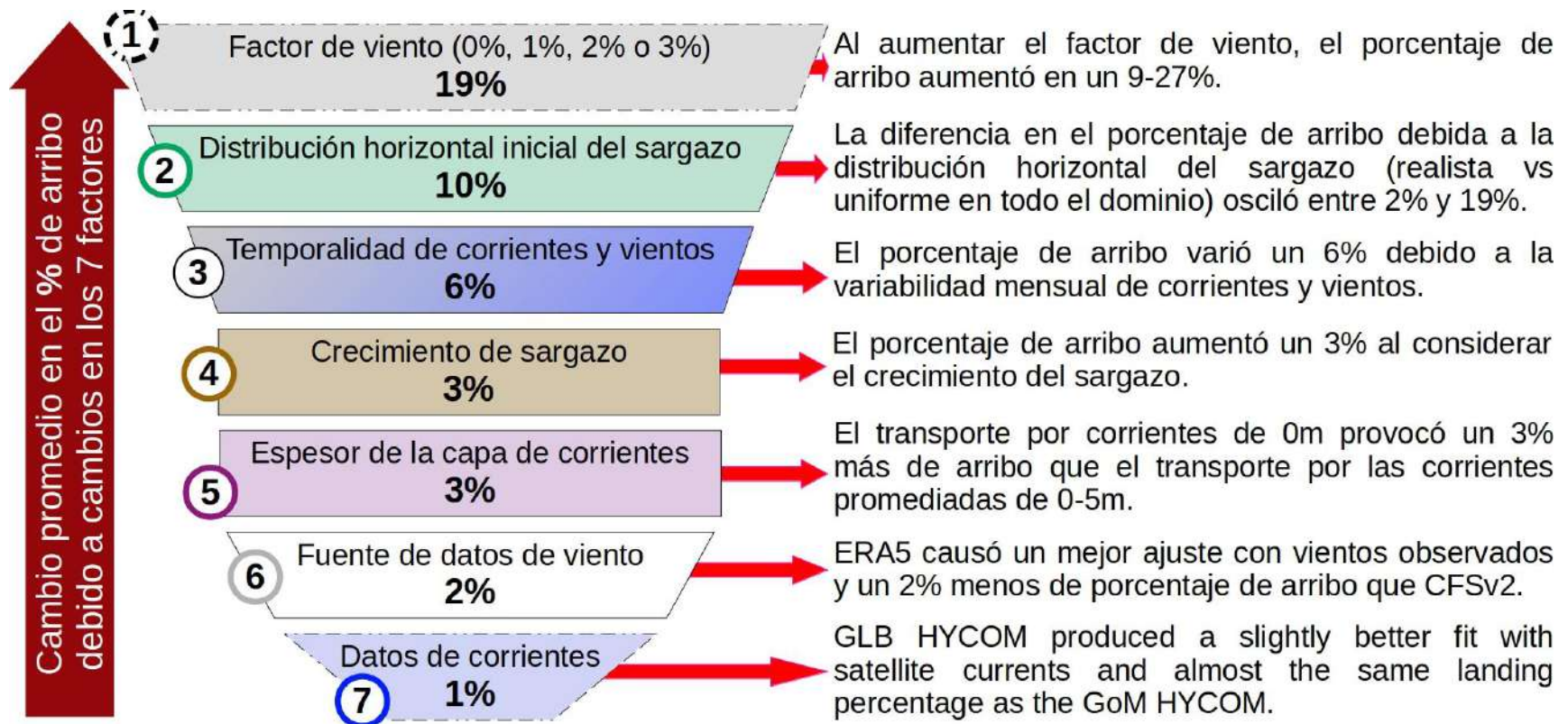


Fig. 16. Efecto de siete factores del modelo sobre las estimaciones de arribo de partículas virtuales (que simulan sargazo) en el Caribe mexicano.

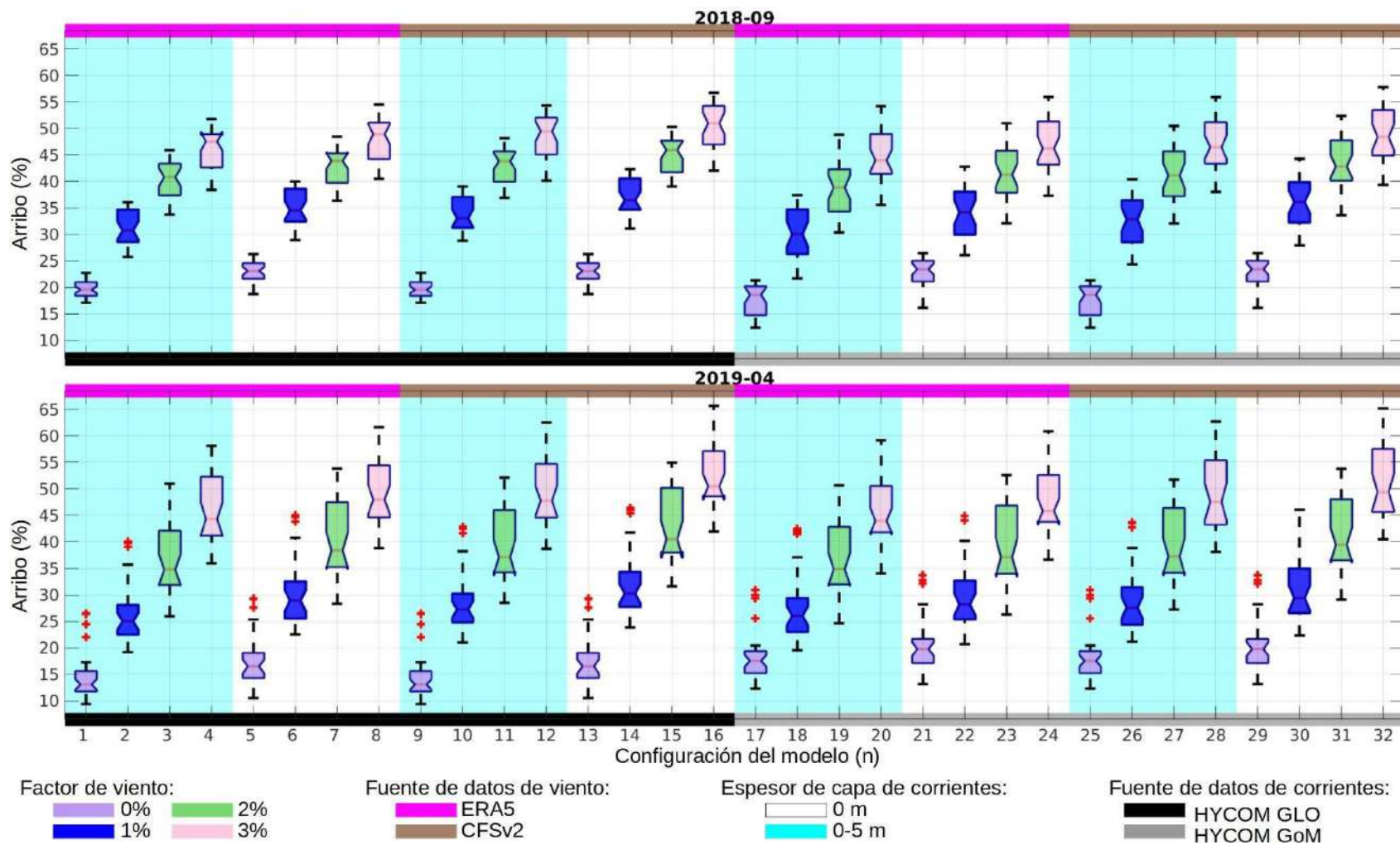


Fig. 17. Gráficos de caja y bigotes que muestran la estimación del porcentaje de arribo cuando las partículas virtuales fueron advectadas con cada una de las 32 configuraciones del modelo. Se muestran los resultados para septiembre de 2018 (panel superior) y abril de 2019 (panel inferior).

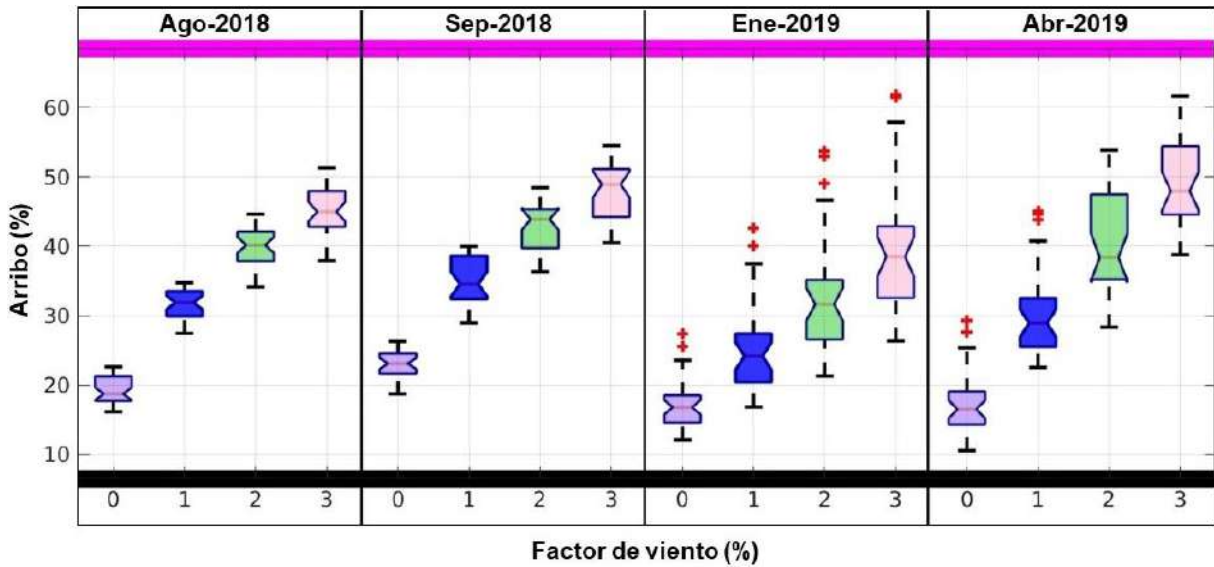


Fig. 18. Gráficos de caja y bigotes que muestran la estimación del porcentaje de arribo cuando las partículas virtuales fueron advectadas con las fuentes de datos más realistas (corrientes del HYCOM Global, corrientes superficiales y vientos de ERA5; Tabla II) y los cuatro factores de viento (0%, 1%, 2% y 3%). Se muestran los resultados para los cuatro meses estudiados.

5.3.1. Factor de viento

En promedio, aumentar el factor de viento aumentó el porcentaje de arribo de las partículas virtuales en aproximadamente un 19%. Un aumento del factor de viento del 1% (e.g., del 0% al 1%, o del 2% al 3%) provocó aproximadamente un 9% más de partículas virtuales arribadas. De manera consistente, con un factor de viento del 3% se provocó aproximadamente un 27% más de partículas virtuales arribadas que con un factor de viento del 0% (Fig. 16). Es decir, en general se observó una relación aproximadamente lineal y directamente proporcional entre el porcentaje de arribo y los valores analizados del factor de viento (Fig. 17, Fig. 18).

Considerando las configuraciones más realistas (Tabla II; Fig. 18), el mayor efecto del factor de viento sobre el promedio del porcentaje de arribo ocurrió en abril de 2019: un factor de

viento de 0% causó un porcentaje de arribo de ~16%, mientras que un factor de viento de 3% causó un porcentaje de arribo de ~47% (incremento de ~31% en el porcentaje de arribo). Por otro lado, el menor efecto del factor de viento sobre el promedio del porcentaje de arribo ocurrió en enero de 2019: un factor de viento de 0% causó un porcentaje de arribo de ~16%, mientras que un factor de viento de 3% causó un porcentaje de arribo de ~38% (incremento de ~22% en el porcentaje de arribo). En agosto y septiembre de 2018, la diferencia debida a considerar un factor de viento de 0% o 3% fue de ~26% en el porcentaje de arribo. Es decir, el impacto sobre las estimaciones del porcentaje de arribo causado por modificar el factor de viento fue ligeramente variable durante los meses estudiados.

5.3.2. Distribución horizontal inicial de las partículas virtuales

El cambio en la distribución horizontal inicial de las partículas virtuales (realista a partir de datos de satélite vs uniforme en todo el dominio) (Fig. 19) provocó que el porcentaje de arribo variara 10% en promedio. Las diferencias más pequeñas (1-5%) ocurrieron con las partículas liberadas el 14 de agosto de 2018 y el 5 de enero de 2019. Las partículas virtuales liberadas en donde se detectó sargazo el 14 de agosto de 2018 por lo general provocaron un 2% más de arribo que las partículas virtuales liberadas uniformemente en todo el dominio y en dicha fecha. Las partículas virtuales liberadas en donde se detectó sargazo el 5 de enero de 2019 por lo general provocaron un 5% menos de arribo que las partículas virtuales liberadas uniformemente en ese día. Por otro lado, las diferencias más grandes (10-20%) en el porcentaje de arribo ocurrieron con las partículas virtuales liberadas el 15 de septiembre de 2018 y el 11 de abril de 2019. Las partículas virtuales liberadas en donde se detectó sargazo el 15 de septiembre de 2018 por lo general provocaron un ~20% más de arribo que las partículas virtuales liberadas uniformemente en todo el dominio. Las partículas

virtuales liberadas el 11 de abril de 2019 en donde se detectó sargazo por lo general provocaron un ~10% menos de arribo que las partículas virtuales liberadas uniformemente en ese día.

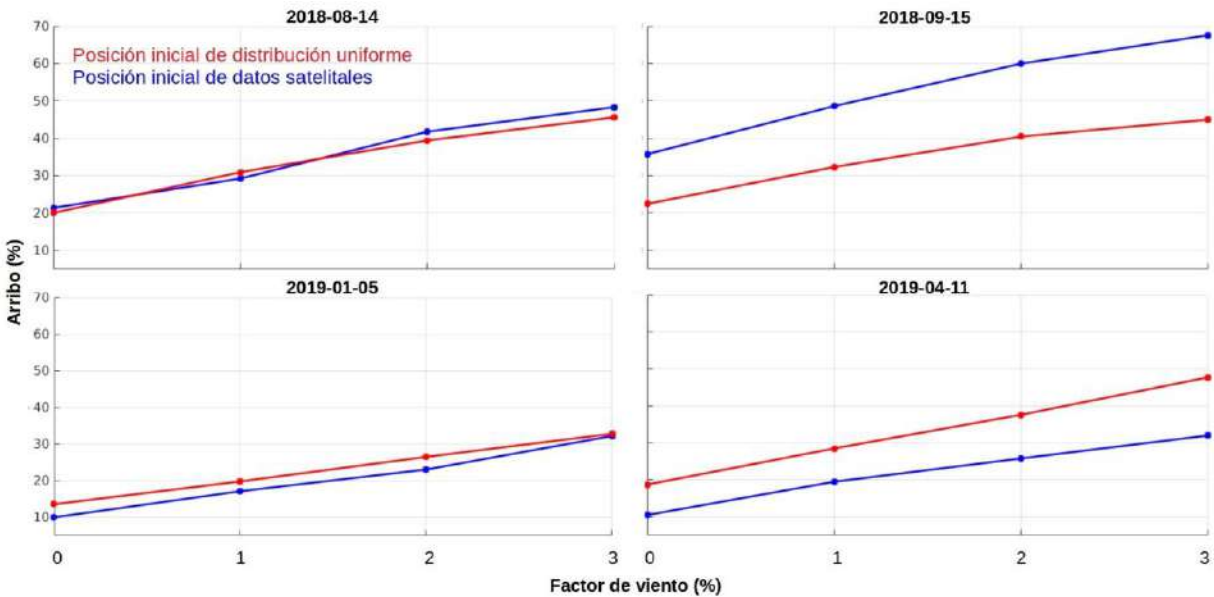


Fig. 19. Porcentaje de arribo en el Caribe mexicano estimado como función del factor de viento y del modo de sembrado espacial de las partículas virtuales, para los cuatro días (indicados en cada panel) de inicialización de las simulaciones. Los valores se obtuvieron a partir de simulaciones de seguimiento de partículas sembradas de manera uniforme en el dominio (**líneas rojas**) o en las coordenadas donde se detectó sargazo con imágenes de Landsat-8 (**líneas azules**). La advección de partículas se realizó con las corrientes superficiales del HYCOM Global y con vientos del reanálisis ERA5.

5.3.3. Variabilidad mensual de los vientos y corrientes marinas

La variabilidad de los vientos y de las corrientes durante los meses analizados provocó una variación promedio del 6% en el porcentaje de arribo. Las mayores diferencias (~9%) ocurrieron entre septiembre de 2018 (verano/otoño) y enero de 2019 (invierno). Por ejemplo, considerando

las configuraciones más realistas con un factor de viento de 3% (Fig. 18), el porcentaje de arribo para septiembre de 2018 fue de 49%, mientras que para enero de 2019 fue de 38% (diferencia de 11%). Por otro lado, las diferencias más pequeñas (~3%) en el porcentaje de arribo ocurrieron entre septiembre de 2018 y abril de 2019 (primavera). Por ejemplo, considerando las configuraciones más realistas con un factor de viento de 3% (Fig. 18), el porcentaje de arribo para septiembre de 2018 (49%) fue casi el mismo que el de abril de 2019 (48%), con una diferencia de tan solo 1%. Por lo general, septiembre de 2018 tuvo mayores porcentajes de arribo (seguido de agosto de 2018), mientras que enero de 2019 tuvo menores porcentajes de arribo (seguido de abril de 2019). También destaca que la variabilidad en el porcentaje de arribo fue mayor durante enero y abril de 2019 (cajas y bigotes más largos, con valores atípicos), y relativamente pequeña durante agosto y septiembre de 2018 (cajas y bigotes cortos, sin valores atípicos) (Fig. 18).

5.3.4. Crecimiento de sargazo

Al incluir en la modelación el crecimiento de sargazo hubo un aumento del porcentaje de arribo de alrededor del 3% (Tabla III). El efecto del crecimiento fue ligeramente mayor en enero de 2019 que durante los demás meses estudiados: al incluir crecimiento, el aumento en el porcentaje de arribo fue de 4% cuando se usaron factores de viento de 1%, 2% y 3%, y de 3% al usar un factor de viento de 0%. Por otro lado, el efecto del crecimiento fue ligeramente menor en abril de 2019 que durante los demás meses estudiados: al incluir crecimiento, el aumento en el porcentaje de arribo fue de 3% cuando se usaron factores de viento de 1%, 2% y 3%, y de 2% al usar un factor de viento de 0%. Aunque el efecto del crecimiento fue un poco menor en enero y abril de 2019 cuando se usó un factor de viento de 0%, las diferencias en el porcentaje de arribo por lo general se observan relativamente constantes e independientes del factor de viento.

Tabla III. Porcentaje de arribo de partículas virtuales en el Caribe mexicano para los cuatro meses de estudio, con y sin crecimiento, y utilizando los cuatro factores de viento. La advección de partículas se realizó con las corrientes superficiales del HYCOM Global y con vientos del reanálisis ERA5.

Mes	Factor de viento (%)	Arribo sin crecimiento (%)	Arribo con crecimiento (%)	Diferencia (%)
2018-ago	0	19	22	3
	1	32	35	3
	2	40	43	3
	3	45	48	3
2018-sep	0	23	26	3
	1	35	39	4
	2	43	46	3
	3	48	51	3
2019-ene	0	17	20	3
	1	25	29	4
	2	33	37	4
	3	40	44	4
2019-abr	0	18	20	2
	1	30	33	3
	2	40	43	3
	3	49	52	3

5.3.5. Espesor de la capa superficial que transporta sargazo

El transporte por las corrientes superficiales (a 0 m de profundidad) causó alrededor de un 3% más de arribo de partículas que el transporte por las corrientes promediadas entre 0 y 5 m de profundidad (Fig. 17). Por ejemplo, para septiembre de 2018, considerando advección de partículas con el HYCOM Global, vientos de ERA5 y un factor de viento de 1%, el porcentaje de arribo fue de ~31% con el promedio de las corrientes en los primeros 5 m (configuración #2) y de ~34% con las corrientes superficiales (configuración #6). De forma similar, considerando advección de partículas

con el HYCOM del Golfo de México, vientos de ERA5 y un factor de viento de 1%, el porcentaje de arribo fue de ~30% con el promedio de las corrientes en los primeros 5 m (configuración #18) y de ~35% con las corrientes superficiales (configuración #22). Lo anterior también es un ejemplo de que la diferencia de ~3% en el porcentaje de arribo, debida a considerar un distinto espesor de la capa de corrientes, se mantuvo consistente sin importar que se usara el HYCOM Global o el HYCOM del Golfo de México. Es decir, el efecto del espesor de la capa de corrientes se observó independiente de la fuente de datos de corrientes.

5.3.6. Fuente de datos de viento

Los vientos provenientes del reanálisis CFSv2 causaron un 2% más de arribo de partículas que los vientos del reanálisis ERA5 (Fig. 17). Por ejemplo, para abril de 2019, considerando advección de partículas con corrientes superficiales del HYCOM Global y un factor de viento de 1%, el porcentaje de arribo fue de ~28% con vientos de ERA5 (configuración #6) y de ~30% con vientos de CFSv2 (configuración #14). De forma similar, considerando advección de partículas corrientes superficiales del HYCOM Global y un factor de viento de 3%, el porcentaje de arribo fue de ~48% con ERA5 (configuración #8) y de ~50% con CFSv2 (configuración #16). Lo anterior también ejemplifica que la diferencia de ~2% en el porcentaje de arribo, debida a considerar vientos de ERA5 o de CFSv2, se mantuvo consistente sin importar el factor de viento utilizado. Es decir, el efecto de la fuente de datos de viento se observó independiente del factor de viento.

5.3.7. Fuente de datos de corrientes marinas

La fuente de datos de circulación oceánica tuvo el menor efecto en la estimación del porcentaje de arribo (Fig. 17). Los resultados del uso del HYCOM Global generalmente difirieron en <1% (estimación del porcentaje de arribo) con respecto a los resultados generados con el HYCOM del

Golfo de México. Sin embargo, no hubo una tendencia clara en los resultados estimados del porcentaje de arribo: a veces el resultado fue ligeramente mayor con HYCOM Global y a veces menor. Por ejemplo, para septiembre de 2018, considerando advección de partículas con el promedio de las corrientes en los primeros 5 m, vientos de ERA5 y un factor de viento de 1%, el porcentaje de arribo fue de ~31% con el HYCOM Global (configuración #2) y de ~30% con el HYCOM del Golfo de México (configuración #18). En contraste, para abril de 2019, considerando advección de partículas con el promedio de las corrientes en los primeros 5 m, vientos de ERA5 y un factor de viento de 1%, el porcentaje de arribo fue de ~25% con el HYCOM Global (configuración #2) y de ~26% con el HYCOM del Golfo de México (configuración #18).

5.4. Discusión

5.4.1. Factor de viento

Los cambios en el factor de viento tuvieron el mayor impacto en las estimaciones del porcentaje de arribo a las costas del Caribe Mexicano. Otros estudios también informan que las estimaciones de transporte de sargazo son altamente sensibles al factor de viento, por lo que este debe de considerarse para poder proporcionar resultados más realistas (e.g., Putman et al., 2018, 2020; Johns et al., 2020). A pesar de que varios estudios de gran escala (a lo ancho de la cuenca del Noratlántico) coinciden en que es más apropiado usar un factor de viento del 1% (e.g., Putman et al., 2018; Johns et al., 2020; Marsh et al., 2021), en otros estudios se ha preferido usar un valor diferente, como el 0.5% (Johnson et al., 2020; Marsh et al., 2022). En un estudio a menor escala espacio-temporal, centrado en una región del norte del Caribe, se encontró que pueden resultar más adecuados los factores de viento del 1%, 2% y 3% (Putman et al., 2020). Las publicaciones citadas

y nuestra investigación respaldan que diferentes valores para el factor de viento pueden proporcionar las aproximaciones más realistas para casos particulares.

Al incrementar el factor de viento se produjo un mayor porcentaje de arribo; esto se debe a que la costa este de la península de Yucatán tiene una orientación principalmente norte-sur, mientras que los vientos predominantes en la región soplan hacia el oeste (Fig. 3). Es decir, el flanco este de la península de Yucatán actúa como una gran pared que se opone al transporte inducido por los vientos alisios en la región. Los eventos de viento del norte, que son de corta duración (~3 días), generalmente ocurren durante el invierno. Durante estos eventos, los vientos y el oleaje remueven sargazo de la costa, y promueven su transporte hacia mar adentro (Rutten et al., 2021). Sin embargo, a lo largo de un mes, incluidos los meses de invierno, la mayor parte del tiempo el viento sopla hacia el oeste (Fig. 3, Fig. 4). Por lo tanto, a escala mensual, el efecto neto del viento fue empujar el sargazo hacia la costa del Caribe mexicano. Los arribos tienden a ser estacionales principalmente porque hay menos sargazo en el mar abierto durante invierno (García Sánchez et al., 2020; Rutten et al., 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2021).

5.4.2. Distribución horizontal inicial de las partículas virtuales

La distribución horizontal inicial de las partículas virtuales fue el segundo factor que más influyó el porcentaje de arribo de partículas virtuales en el Caribe mexicano. Sin embargo, hubo variaciones importantes: el efecto de la distribución horizontal inicial fue relativamente pequeño para las partículas liberadas el 14 de agosto de 2018 y el 5 de enero de 2019 (diferencias en el porcentaje de arribo entre 1% y 5%), y relativamente grande para las partículas liberadas el 15 de septiembre de 2018 y el 11 de abril de 2019 (diferencias en el porcentaje de arribo entre 10% y 20%) (Fig. 19).

Las diferencias pequeñas en el porcentaje de arribo, correspondientes al 14 de agosto de 2018 y al 5 de enero de 2019, están relacionadas con una distribución espacial más uniforme del sargazo que se detectó satelitalmente en el Caribe mexicano (Fig. 9). Para el caso del 5 de enero de 2019, las partículas liberadas en donde se detectó sargazo causaron ~5% menos de arribo que las partículas liberadas uniformemente. Esto indica que el sargazo detectado satelitalmente en esa fecha estaba un poco menos concentrado en las aguas del Caribe mexicano que aportan sargazo a la línea de costa de la región. En contraste, las diferencias grandes correspondientes al 15 de septiembre de 2018 y al 11 de abril de 2019 están relacionadas con una distribución espacial menos uniforme del sargazo que se detectó satelitalmente en el Caribe mexicano. Para el caso del 15 de septiembre de 2018, las partículas liberadas en donde se detectó sargazo causaron ~20% más arribo que las partículas liberadas uniformemente. Esto indica que el sargazo detectado satelitalmente en esa fecha estaba un poco más concentrado en las aguas del Caribe mexicano que aportan sargazo a la línea de costa de la región: el sargazo abundaba cerca de la costa (Fig. 9). Para el caso del 11 de abril de 2019, las partículas liberadas en donde se detectó sargazo causaron ~10% menos arribo que las partículas liberadas uniformemente. Esto indica que el sargazo detectado satelitalmente en esa fecha estaba un poco menos concentrado en las aguas del Caribe mexicano que aportan sargazo a la línea de costa de la región: el sargazo abundaba en aguas más hacia el noreste del Caribe mexicano y más alejadas de la costa (Fig. 9). Lo anterior evidencia que no todo el sargazo en las aguas del Caribe mexicano arribará en la región, y se respalda la importancia de tener detecciones de sargazo precisas que se puedan usar como entradas de condición inicial para modelos numéricos (Cuevas et al., 2018; Hu et al., 2015; Wang y Hu, 2021).

5.4.3. Variabilidad mensual de vientos y corrientes marinas

La variabilidad mensual de vientos y corrientes marinas fue el tercer factor que más influyó el porcentaje de arribo de partículas virtuales en el Caribe mexicano. En enero de 2019, el porcentaje de arribo fue visiblemente menor en comparación con los otros meses (e.g., 24% con un factor de viento de 1%) (Fig. 18), lo cual es consistente con una menor frecuencia de vientos del este y sureste, con un predominio de vientos del noreste y con la ocurrencia de algunos intensos nortes (Fig. 3). Esto se ve reflejado en la circulación media de dicho mes como un debilitamiento en la rapidez de los vientos y un predominio de vientos del noreste (Fig. 4). Es probable que los vientos del norte frenen o reviertan el flujo de sargazo hacia la costa, dando más oportunidad a que las macroalgas “esquiven” la península de Yucatán para continuar con su recorrido hacia el Golfo de México. Rutten et al. (2021) también reportan que los vientos del norte se asocian a un menor arribo de sargazo en el Caribe mexicano. Por otro lado, en enero de 2019 también se observa la mayor variabilidad en el porcentaje de arribo, lo cual se relaciona con una mayor variabilidad en los vientos de ese mes (Fig. 3).

La variabilidad mensual de corrientes y vientos a escala local, aunque no fue despreciable, tampoco fue el principal factor que moduló el porcentaje de arribo. Esto se puede deber a la relativa poca variabilidad en los patrones de circulación atmosférica y oceánica durante los meses estudiados (Fig. 4, Fig. 5). Por un lado, la Corriente de Yucatán es una característica permanente del Caribe mexicano, y por otro lado los vientos alisios dominan a lo largo del año (Centurioni y Niiler, 2003; Chadee y Clarke, 2015). No obstante, es posible que ocurran patrones de circulación oceánica y atmosférica considerablemente distintos a los de los meses aquí analizados, los cuales se esperaría que tengan un impacto en las estimaciones de porcentajes de arribo.

5.4.4. Crecimiento de sargazo

Tiene sentido que el crecimiento del sargazo en el Caribe mexicano fuera relativamente bajo (Tabla III), considerando que se rastrearon partículas por menos de 10 días, y que el estado trófico del agua de mar, inferido a partir de concentraciones de clorofila-a, produjo tiempos de duplicación de 26 a 38 días en aguas oceánicas, y de ~7 días como mínimo en aguas neríticas (Fig. 20). Es de esperar que el estado trófico del agua y que el mayor crecimiento posible de sargazo debido al mismo sean mayores (menores) en aguas con más (menos) nutrientes (Istvánovics, 2009; Lapointe et al., 2014; Yoshino et al., 2015). Durante los meses estudiados, la clorofila-a y en consecuencia el tiempo de duplicación, aumentaron estando más cerca de la línea de costa. A más de ~20 km de la costa, la clorofila-a generalmente fue inferior a 0.2 mg/m^3 (tiempos de duplicación entre 34 y 38 días), mientras que a menos de ~20 km de la costa, pero por fuera de la zona nerítica, se observaron valores más frecuentemente entre 0.2 y 0.3 mg/m^3 (tiempos de duplicación entre 25 y 31 y días). Las concentraciones de clorofila-a que superan los 1.4 mg/m^3 (tiempos de duplicación de ~7 días), relacionadas con las tasas máximas de crecimiento del sargazo (Ec. 5), sólo se observaron en sitios sobre la estrecha plataforma continental (Fig. 20). Condal et al. (2013) encontraron una distribución de clorofila-a similar, señalando que las concentraciones altas de clorofila en el Caribe mexicano por lo general ocurren a lo largo de una franja costera muy estrecha. En consecuencia, se esperaría que el crecimiento máximo del sargazo en el Caribe mexicano, debido al estado trófico del agua de mar, generalmente ocurra en la zona nerítica, esencialmente dentro de las lagunas arrecifales.

El que haya resultado relativamente bajo el posible crecimiento del sargazo debido al estado trófico del agua del Caribe mexicano implica que la mayor parte de la biomasa que arribó a las costas de la región pudo crecer gracias al aporte de nutrientes que adquirió a lo largo de su ruta de viaje, mayormente por fuera de aguas mexicanas. Asimismo, el Caribe mexicano no es un principal

proveedor de los nutrientes que permiten la proliferación de las mareas doradas que ingresan al Golfo de México en donde arriban, o salen por el estrecho de Florida. Es más probable que una mayor parte de los nutrientes que permitieron la proliferación masiva del sargazo que llega al Caribe Mexicano y/o que entran a Golfo de México se haya adquirido en zonas como la NERR, el norte de Brasil y el Caribe oriental (Fig. 2) (Gower et al., 2013; Franks et al., 2016; Oviatt et al., 2019; Johns et al., 2020).

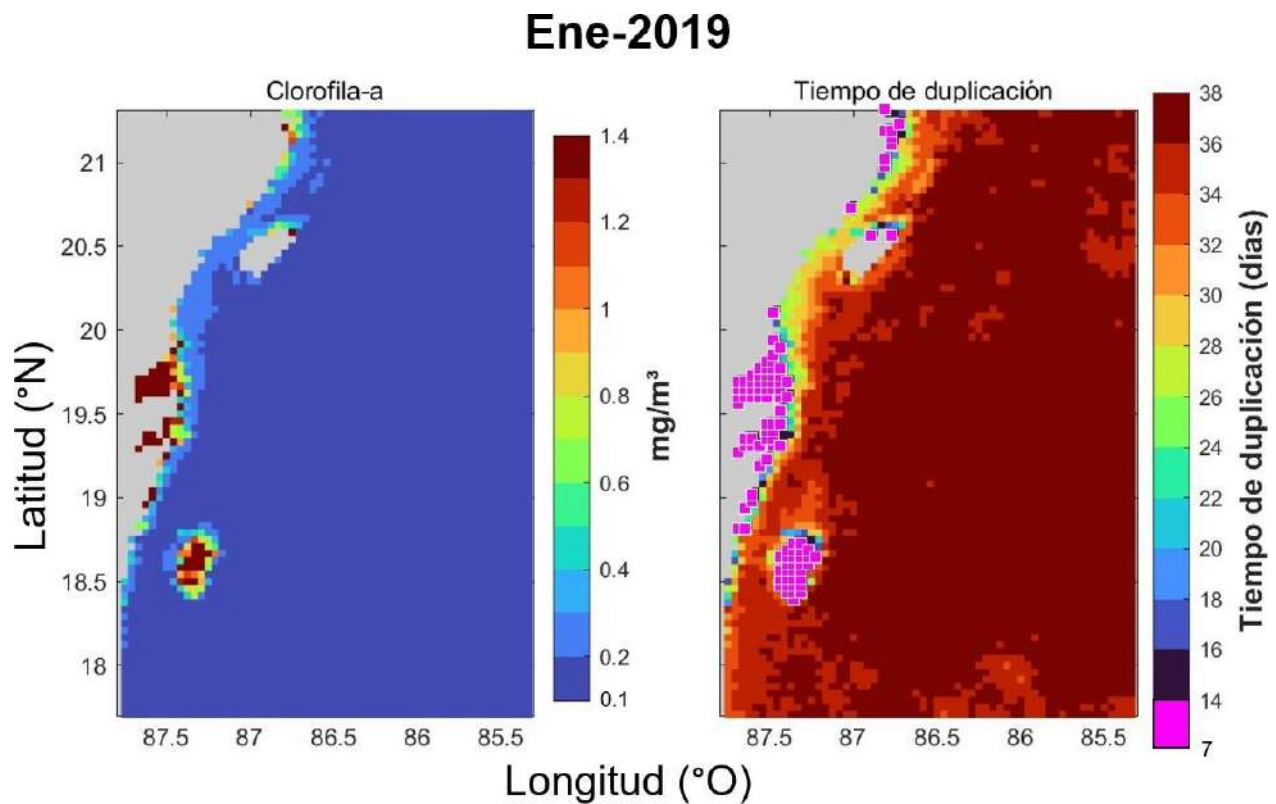


Fig. 20. Panel de la izquierda: promedio mensual, para enero de 2019, de la concentración de clorofila-a en el Caribe mexicano, según datos satelitales de ESA-CCI (Sección 4.2.3). Panel de la derecha: tasas de crecimiento exponencial (expresadas como tiempo de duplicación) que se usaron para hacer crecer la “biomasa” de las partículas virtuales durante el mes indicado (Sección 4.3.1.5.). Las tasas de crecimiento se estimaron a partir de datos de concentración de clorofila-a y de tasas

de crecimiento de sargazo reportadas en la literatura (Sección 4.3.1.5.). Se usó la Ec. (7) para convertir duplicaciones/día a tiempo de duplicación.

Otro punto para considerar con relación al crecimiento es la incertidumbre en la biomasa inicial de las balsas de sargazo detectadas por satélite. Considerando que cada píxel con sargazo de una imagen satelital tiene una cobertura mínima de sargazo del 20% (Hu et al., 2015), y que las balsas de sargazo tienen al menos 1.26 kg húmedos/m² (Wang et al., 2018), cada píxel de sargazo de Landsat-8 tendría aproximadamente 0.2 toneladas húmedas de sargazo. Considerando una cobertura máxima del 100% y que las balsas de sargazo tienen hasta 6.74 kg húmedos/m² (Wang et al., 2018), cada píxel de sargazo de Landsat-8 tendría alrededor de 6 toneladas húmedas. Por lo tanto, la estimación superior de biomasa es ~3000% mayor que la estimación inferior de biomasa. Sin embargo, considerando una tasa de crecimiento de 0.018 duplicaciones/día, que corresponde a la media de clorofila-a de 0.15 mg/m³ en el Caribe mexicano, la biomasa de sargazo habría aumentado en ~20% después de 10 días. Esto muestra que para las escalas espaciales y temporales estudiadas, modelar el crecimiento difícilmente mejora las estimaciones de arribo si la incertidumbre en la biomasa inicial de sargazo es tan grande. Consistente con esto, Brooks et al. (2018) concluyeron que la incorporación del crecimiento es más relevante si se modelan tiempos de viaje más largos (del orden de meses). De manera similar, los efectos inerciales en el transporte no pueden ser reproducidos con precisión si la biomasa inicial de las balsas de sargazo es incierta. Según Brooks et al. (2019), las trayectorias de una semana podrían tener desviaciones de hasta decenas de kilómetros debido a la inercia. En este estudio, las partículas virtuales generalmente arribaron en menos de 7 días, por lo que los sesgos en la estimación de arribo debidos a la inercia deben de disminuir si los resultados se interpretan en la escala regional (e.g., secciones de costa de algunas decenas de kilómetros) y no localmente (e.g., a nivel de bahía).

5.4.5. Espesor de la capa superficial que transporta sargazo

El transporte por las corrientes superficiales (a 0 m de profundidad) causó alrededor de un 3% más de arribo de partículas que el transporte por las corrientes promediadas entre 0 y 5 m de profundidad. Esto era de esperarse ya que, a menor profundidad, mayor es la influencia de los vientos, y cabe recordar que los vientos en el Caribe mexicano generalmente favorecen el arribo de sargazo. Por lo general, las corrientes superficiales fueron de 0.02 a 0.06 m/s más rápidas que las corrientes medias entre 0 y 5 m, y estas últimas se rotan ligeramente en sentido horario debido al cambio de dirección de Ekman (Shapiro, 2004; Shapiro et al., 2004) (Fig. 21). Estas diferencias en velocidad y dirección hicieron que las corrientes superficiales fueran ligeramente más favorables para el arribo de sargazo. Como la diferencia en el porcentaje de arribo fue muy pequeña y el sargazo se encuentra en los primeros 50 cm de la superficie del mar (Ody et al., 2019), un enfoque eficiente es modelar el transporte de sargazo a la escala estudiada únicamente con las corrientes superficiales. En la gran escala, Brooks et al. (2018) también encontraron poca diferencia entre considerar transporte por corrientes superficiales (0 m) o por corrientes que incluyan la subsuperficie. También existen balsas de sargazo que se desplazan subsuperficialmente (Schamberger et al., 2022), al menos durante un tiempo, y en este caso se debería de considerar transporte por corrientes subsuperficiales y un factor de viento de 0%, pues las balsas no son arrastradas directamente por el viento. Sin embargo, es probable que el sargazo eventualmente reemerja y esté en contacto con la superficie durante la mayor parte del tiempo pues las vesículas de gas generalmente le confieren flotabilidad positiva (Woodcock, 1950, 1993).

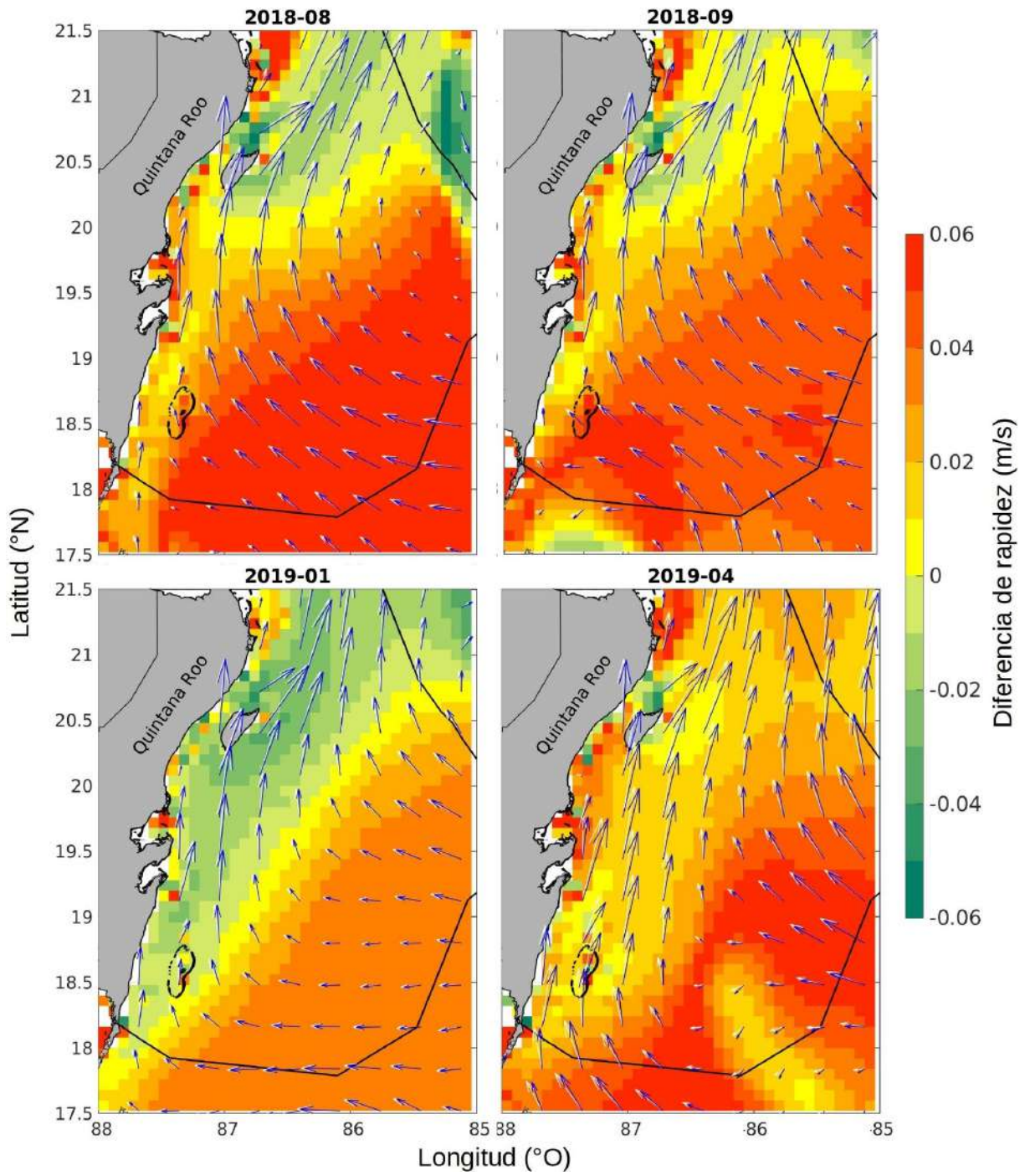


Fig. 21. Promedio mensual de las corrientes superficiales (flechas blancas) y del promedio vertical de las corrientes en los primeros 5 m (flechas azules) del Caribe mexicano. El color de fondo indica la diferencia de la rapidez de las corrientes superficiales menos la rapidez de las corrientes promediadas en los primeros 5 m.

5.4.6. Fuente de datos de viento

Los vientos provenientes del reanálisis CFSv2 causaron un 2% más de arribo de partículas que los vientos del reanálisis ERA5. Esto era de esperarse, porque los vientos de CFSv2 fueron generalmente más intensos que los vientos de ERA5, especialmente a lo largo de la región costera (sección 4.3.2), y porque intensificaciones en los vientos del este (e.g., aumentando el factor de viento) están asociadas con más arribo.

5.4.7. Fuente de datos de corrientes marinas

La fuente de datos de circulación oceánica tuvo el menor efecto en la estimación del porcentaje de arribo. Los resultados del uso del HYCOM Global generalmente difirieron en <1% (estimación del porcentaje de arribo) con respecto a los resultados generados con el HYCOM del Golfo de México. Sin embargo, no hubo una tendencia clara en los resultados estimados del porcentaje de arribo; a veces el resultado fue ligeramente mayor con HYCOM Global y a veces menor.

5.5. Conclusiones

En conclusión, la estimación del porcentaje de arribo de sargazo en la costa del Caribe mexicano se vio más influenciada por cambios en el factor de viento, por cambios en la distribución horizontal inicial del sargazo (en segundo lugar) y por la variabilidad mensual de las corrientes y vientos (en tercer lugar). Por otro lado, considerar crecimiento de sargazo y cambios en el espesor de la capa de corrientes tuvieron un efecto similar y relativamente bajo, aunque considerar distintas fuentes de datos de viento y de corrientes fue lo que menos influyó en la estimación del porcentaje de arribo. El factor de viento resultó ser el más influyente debido al efecto conjunto de la orientación de la costa este de la península de Yucatán (norte-sur) y la dirección predominante de los vientos

(hacia el oeste): cuando los vientos se intensifican hay un mayor arrastre de sargazo hacia la línea de costa. Sin vientos del este, el sargazo fluiría mayormente hacia el norte, junto con la Corriente de Yucatán. Por otro lado, tener un método confiable para discriminar sargazo satelitalmente es muy importante, ya que falsos positivos o falsos negativos en la detección conducirán a sobre- o sub- estimaciones de arribo. Entonces, para mejorar la precisión de los modelos numéricos de transporte de sargazo en el Caribe mexicano, se destaca la importancia de (a) considerar arrastre por viento con un factor de viento adecuado (variable y difícil de determinar *a priori*), (b) disponer de detecciones satelitales de sargazo que sean precisas, como las usadas en este estudio, y (c) disponer de campos de velocidad de viento y corrientes lo más realistas posibles. Los resultados de este estudio son útiles para diseñar sistemas más eficientes de seguimiento de sargazo en el Caribe mexicano. Sin embargo, a fin de fortalecer la capacidad de pronóstico y mitigación de este fenómeno en la región, es necesario seguir investigando para mejorar la precisión de los modelos de transporte de sargazo y la detección satelital del mismo. Por ejemplo, la detección satelital empleada en este estudio se podría mejorar al incrementar su resolución espacial y temporal.

6° capítulo – Análisis mensual de la dinámica del sargazo en el Caribe mexicano

6.1. Introducción

Las dinámicas de transporte del sargazo en el Caribe mexicano han sido muy poco estudiadas, y no se cuenta con una caracterización, espacial ni temporal, de las rutas de dispersión que sigue el sargazo para entrar a las aguas del Caribe mexicano y arribar en la región o salir hacia otras zonas (Uribe-Martínez et al., 2022; Cuevas et al., 2023). Conocer a qué parte de la costa es más probable que arribe el sargazo, así como sus trayectorias y tiempos de viaje, sería de gran utilidad para dirigir esfuerzos de mitigación hacia zonas más vulnerables, recolectar sargazo antes o inmediatamente después de que arribe, y tener un tiempo de preparación antes del arribo masivo de sargazo en una región particular (Webster y Linton et al., 2013; Uribe-Martínez et al., 2022). El objetivo que corresponde a este capítulo es entender aspectos de la dinámica mensual del transporte y potencial de arribo del sargazo en el Caribe mexicano.

A continuación, se mencionan algunos trabajos que ofrecen información sobre dinámicas de distribución y transporte de sargazo en el Caribe mexicano.

García-Sánchez et al. (2020) analizaron las cantidades de sargazo que arribaron a Puerto Morelos en el periodo 2016-2020. Encontraron que los picos de arribo ocurrieron durante verano, lo cual se explica por la mayor abundancia de sargazo en la Corriente de Yucatán durante dicha temporada, así como por la predominancia de vientos del este, que empujan sargazo hacia la orilla. Por otro lado, los vientos de invierno (Nortes) inhiben el transporte de sargazo hacia la costa de forma tal que, aunque haya sargazo en la Corriente de Yucatán, los arribos son escasos (García-Sánchez et al., 2020).

Chávez et al. (2020) analizaron la cobertura de sargazo en aguas del Caribe mexicano a partir de imágenes Landsat-8 de los años 2014 a 2020. Reportan una mayor ocurrencia de sargazo en septiembre de 2018 y en abril de 2019, siendo 2018 el año con mayor ocurrencia de sargazo. Para el caso de septiembre de 2018, grandes cantidades de sargazo se detectaron en la zona costera entre Tulum y Playa del Carmen, incluida la costa este de la isla de Cozumel. La cobertura de sargazo en aguas costeras fue menor entre Cancún y Puerto Morelos (norte del Caribe mexicano), así como al sur de Punta Herrero (sur del Caribe mexicano). En general, Chávez et al. (2020) observaron una alta variabilidad espacial y temporal en la cobertura de sargazo en aguas de Caribe mexicano, así como una coincidencia entre el volumen de sargazo que se detectado satelitalmente en el mar y el volumen de sargazo arribado en la región (particularmente en Puerto Morelos).

Rodríguez-Martínez et al. (2022) analizaron las tendencias de arribo de sargazo en siete playas del norte del Caribe mexicano, durante el periodo 2018-2019. Ellos encontraron que los picos de arribo ocurrieron en verano, cuando predominan vientos del este, siendo 2018 el año con mayor afluencia de sargazo; sin embargo, los patrones de arribo fueron variables entre las playas y los periodos estudiados. Asimismo, ellos reportan una relación entre la cantidad de sargazo detectado satelitalmente en el mar y la cantidad de sargazo que arribó, lo cual evidencia la posibilidad de predecir eventos de arribo a lo largo de la costa. Dichas predicciones serían más convenientes para secciones costeras grandes (decenas de kilómetros), pues para escalas menores (kilómetros) habría que considerar procesos más complejos como viento local, oleaje, geomorfología y circulación costera (Rodríguez-Martínez et al., 2022).

Uribe-Martínez et al. (2022) analizaron la cobertura de sargazo en aguas de Caribe mexicano mediante imágenes satelitales de 2014 a 2020. Encontraron que las aguas cercanas a la costa, desde Tulum hasta Puerto Morelos, tuvieron una mayor cobertura de sargazo, lo cual

coincide con un mayor registro de arribos en dicha región. Además, se reporta que vientos tranquilos (<4 m/s) favorecen acumulación de sargazo sobre las playas, mientras que vientos intensos (8 m/s) y un mayor oleaje inhiben dicha acumulación. No obstante, el flujo de sargazo desde el mar abierto hacia la costa, y finalmente a las playas, es resultado de una serie de interacciones intrincadas entre la ubicación de las balsas de sargazo y las condiciones oceánicas y atmosféricas a distintas escalas (Uribe-Martínez et al., 2022).

6.2. Métodos

Se liberaron partículas virtuales durante los primeros 30 días de cada mes, en toda la rejilla dentro del Caribe mexicano, y se rastrearon hacia adelante hasta 10 días. La advección de partículas utilizó las opciones más realistas de configuración del modelo (Tabla II). Si una partícula arribaba en la costa del Caribe mexicano, se registraba su tiempo de viaje y las coordenadas geográficas de arribo.

Para estimar el potencial de arribo del sargazo en las costas del Caribe mexicano, se cuantificaron las partículas que arribaron en rangos latitudinales de $1/4^\circ$ para cada mes. Los resultados se estandarizaron a porcentaje de arribo dividiendo el número de partículas por rango de latitud entre el número total de partículas liberadas por mes (3267 partículas por día * 30 días de liberación = 98,010 partículas). Este análisis consideró partículas con crecimiento de sargazo y aquellas sin él (Fig. 22).

La probabilidad de arribo para cada mes se calculó a partir de los datos de arribo de los 30 días de liberación. Una probabilidad de 1 significa que las 30 partículas liberadas en el vértice correspondiente de la rejilla arribaron al Caribe mexicano. El tiempo de viaje y las coordenadas geográficas de arribo para cada mes se calcularon como el promedio de tiempo o coordenadas de arribo, respectivamente, de todas las partículas que arribaron al Caribe mexicano. Se muestran

mapas de probabilidad de arribo, tiempo de viaje y latitud de arribo (Fig. 23) correspondientes a las simulaciones con un factor de viento del 2%, no porque dicho valor se considera más realista, sino porque representa el valor central de los factores de viento que se analizaron (1%, 2% y 3%).

Se construyeron rangos de incertidumbre representados por conos que relacionan el tiempo de viaje y los sitios de arribo para tres regiones seleccionadas: Puerto Aventuras ($\sim 20.5^{\circ}\text{N}$), Tulum ($\sim 20.25^{\circ}\text{N}$) y Boca Paila ($\sim 20^{\circ}\text{N}$) (Fig. 24). Se extrajeron las coordenadas geográficas de las isolíneas de la latitud media de arribo de cada ubicación, luego se interpoló el tiempo medio de viaje a esas coordenadas. Las isolíneas obtenidas a partir de datos que consideran factores de deriva del 1% y el 3% representaron los límites exteriores de los conos. La isolínea correspondiente a un factor de deriva del 2% representa la región central de los conos.

La densidad de las trayectorias de las partículas que arribaron a lo largo del Caribe mexicano se estimó mediante la realización de experimentos en reversa en el tiempo. Se liberaron partículas diariamente (durante los primeros 30 días de cada mes estudiado) a lo largo de la costa, con una separación uniforme de $1/25^{\circ}$ (165 partículas), y se rastrearon hacia atrás durante 7 días. Para cada uno de los cuatro meses, se consideraron las posiciones de las partículas cada 6 horas para calcular la densidad de partículas por celda de la cuadrícula (resolución horizontal de la cuadrícula = $1/25^{\circ}$). La densidad se estandarizó a porcentaje, dividiendo la densidad de cada celda de la cuadrícula por la densidad máxima obtenida en los cuatro meses (Fig. 25).

Para encontrar la región oceánica de la cual las partículas que arribaron se desprendieron de la Corriente de Yucatán por los vientos alisios, se restaron las probabilidades de arribo calculadas con un factor de deriva del 0% de las probabilidades de arribo calculadas con factores de deriva del 1%, 2% y 3%. Las diferencias positivas indican que las probabilidades de arribo aumentaron debido a los vientos alisios (Fig. 26).

6.3. Resultados

6.3.1. Potencial de arribo a lo largo del Caribe mexicano

Los mayores porcentajes de arribo ocurrieron principalmente en septiembre de 2018 (e.g., 43% de arribo con un factor de viento del 2%) (Fig. 22). En contraste, los menores porcentajes de arribo ocurrieron principalmente en enero de 2019 (e.g., 33% de arribo con un factor de viento del 2%). La costa del Caribe mexicano entre Tulum (~ 20.75°N) y Puerto Morelos (~ 20.75°N) fue la más propensa al arribo de sargazo, incluyendo el flanco oriental de la isla Cozumel, mientras que los porcentajes de arribo disminuyeron al norte de Puerto Morelos (~20.9°N) (Fig. 22).

El crecimiento modelado del sargazo fue ligeramente diferente durante los meses estudiados (Fig. 22). En enero de 2019, el crecimiento fue ligeramente mayor que durante los demás meses. Durante enero de 2019, considerando un factor de viento del 2%, el porcentaje de arribo fue del 33% sin crecimiento y del 37% con crecimiento. Esto significa que aproximadamente el 11% de la biomasa modelada que arribó en las costas del Caribe mexicano durante enero de 2019 se generó a lo largo de las trayectorias de viaje de las partículas virtuales. El menor efecto del crecimiento ocurrió en septiembre de 2018 con un factor de viento del 3%: el porcentaje de arribo fue del 48% sin crecimiento y del 51% con crecimiento. Por lo tanto, el 6% de la biomasa modelada que arribó al Caribe mexicano durante septiembre de 2018 se generó a lo largo de las trayectorias de viaje de las partículas virtuales.

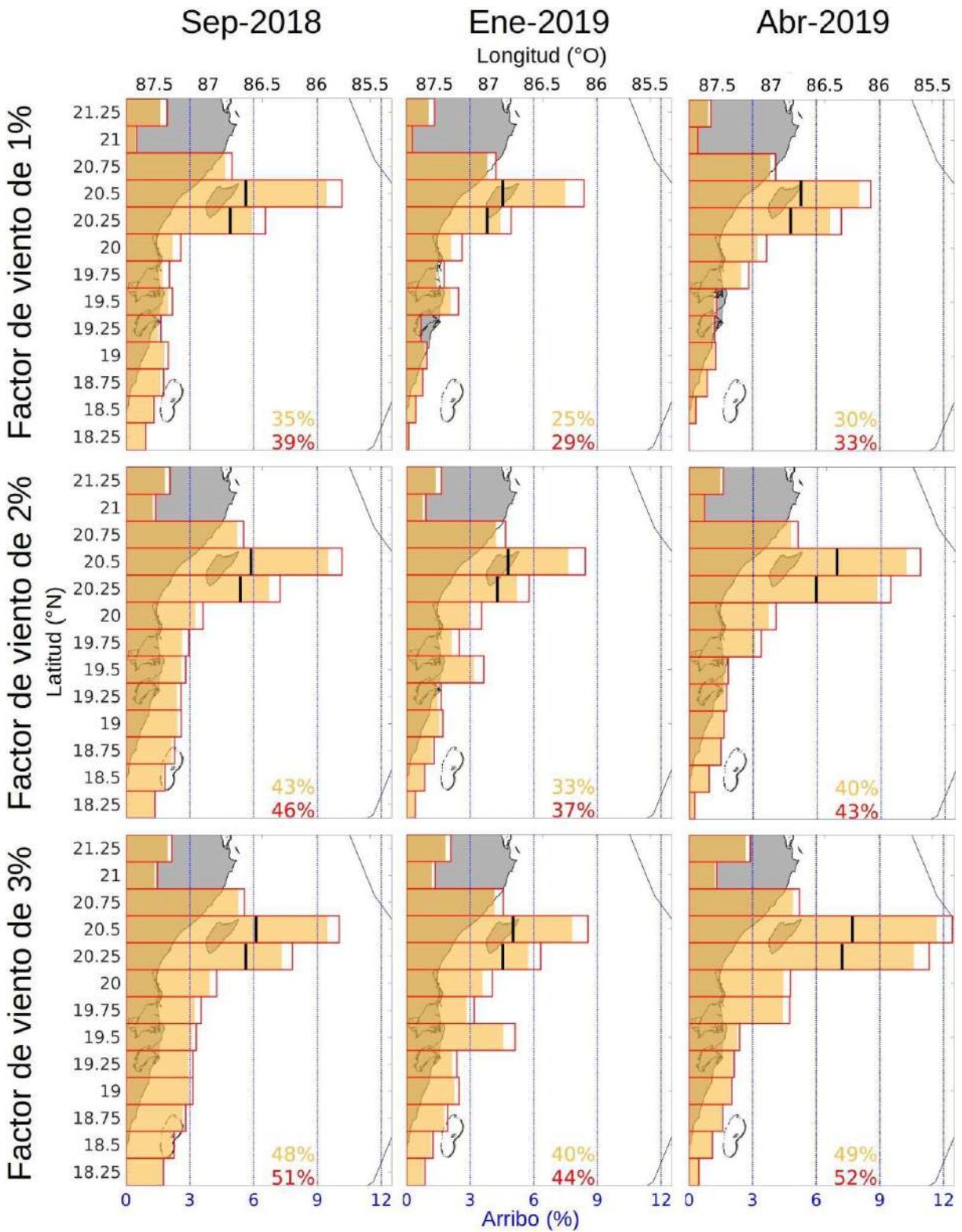


Fig. 22. Porcentaje de partículas que arribaron dentro de un rango de latitud determinado, durante septiembre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019, según diferentes factores de viento (1%, 2% y

3% de la rapidez del viento). Las **barras anaranjadas** representan los resultados sin crecimiento de sargazo, mientras que las **barras blancas con borde rojo** representan los resultados con crecimiento de sargazo. Las **líneas verticales negras** dividen a las barras anaranjadas de forma tal que en la parte izquierda está lo que arribó al continente y en la parte derecha lo que arribó a la isla de Cozumel. Los histogramas se superponen en la costa oriental de Yucatán. Los resultados se basan en las corrientes superficiales del HYCOM Global y en los vientos del reanálisis ERA5.

6.3.2. Probabilidades de arribo del sargazo localizado en mar abierto

El sargazo con mayor probabilidad de arribar al Caribe mexicano se encontró en aguas cercanas a la costa (≤ 20 km mar adentro) y hasta 100 km mar adentro en el sur del Caribe mexicano, al sur de $\sim 19^\circ\text{N}$ (Fig. 23). Por otro lado, el sargazo ubicado a más de ~ 50 km mar adentro en el noreste del Caribe mexicano, al norte de Punta Herrero ($> 19.5^\circ\text{N}$), tuvo poca probabilidad de arribar al Caribe mexicano. Durante septiembre de 2018, una zona más extensa del Caribe mexicano tuvo mayor probabilidad de funcionar como fuente de sargazo para las costas del Caribe mexicano (el área en color rojo se observa más extendida). En contraste, durante enero de 2019, el área con alta probabilidad de ser una fuente de sargazo fue menor y estaba más cercana a la costa. Entonces, hay una variabilidad temporal en la forma del área marina que con mayor probabilidad proporciona sargazo a las costas del Caribe mexicano (área en color rojo).

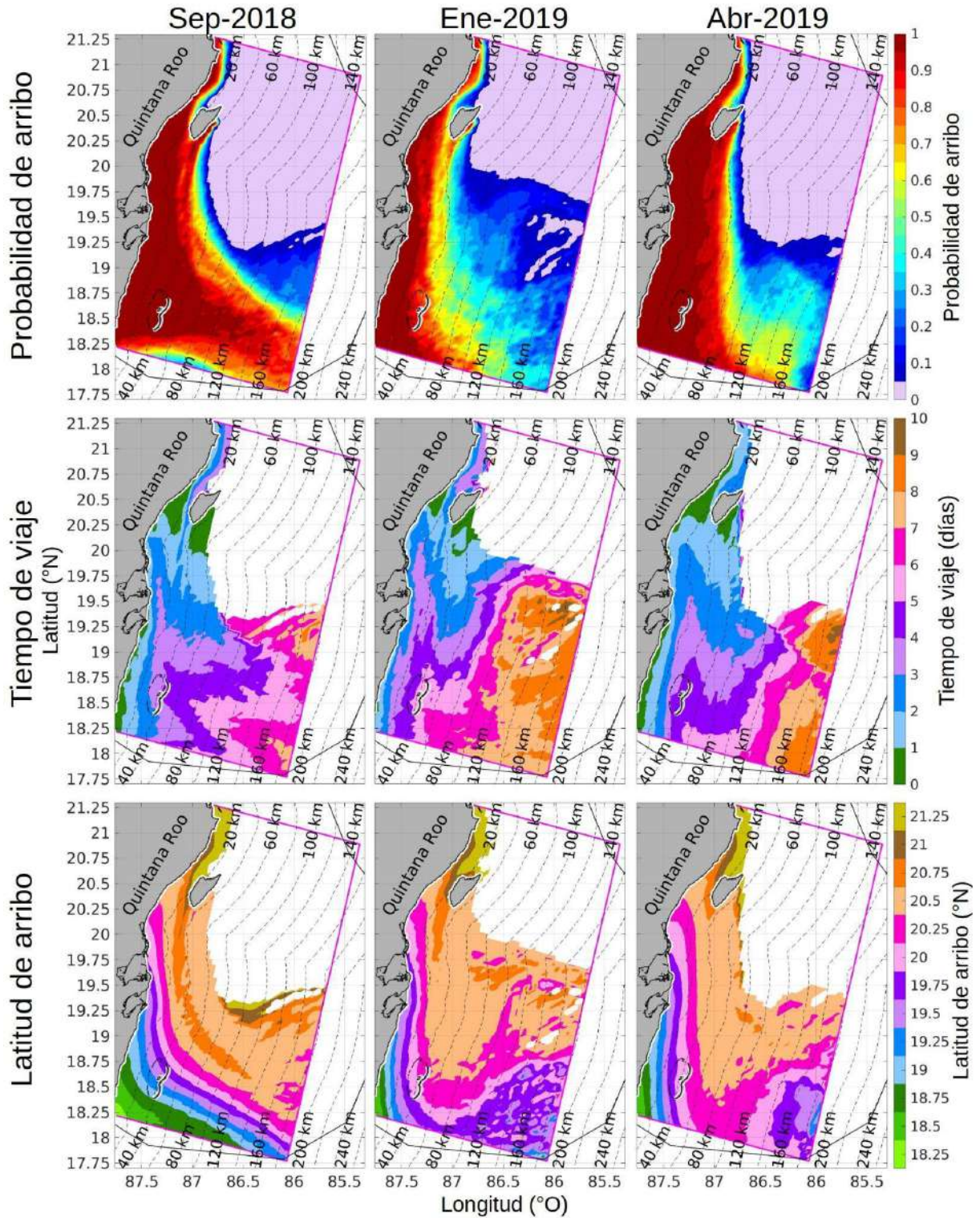


Fig. 23. Estimaciones de la probabilidad de arribo, tiempo de viaje y latitud de arribo del sargazo, dependiendo de su posición en el Caribe mexicano durante septiembre de 2018, enero de 2019 y

abril de 2019. Los resultados utilizan corrientes superficiales del modelo HYCOM Global y vientos del análisis ERA5 (factor de viento del 2%). Las líneas de contorno discontinuas representan la distancia (en km) al punto más cercano de la costa. La línea negra gruesa delimita el Caribe mexicano. La línea blanca fina a lo largo de la costa indica que los procesos de arribo a pequeña escala no se tuvieron en cuenta en el modelo.

6.3.3. Tiempos probables de viaje del sargazo que arribará en el Caribe mexicano

El tiempo de viaje de las partículas que arribaron fue generalmente más corto para las partículas más cercanas a la costa (Fig. 23). Por ejemplo, en abril de 2019, las partículas sobre el Banco Chinchorro (a ~40 km de la línea de costa continental) generalmente arribaron después de 3 a 6 días de viaje, mientras que las partículas en la misma latitud (~18.5°N) pero a ~160 km de la costa generalmente arribaron después de 5-8 días. Las partículas a menos de 20 km de la costa generalmente arribaron en menos de 4 días. Al promediar el tiempo de viaje de todas las partículas dentro del dominio que arribaron al Caribe mexicano, el promedio fue de 3.8 días. En general, el tiempo de viaje disminuyó a medida que aumentó el factor de viento. Por ejemplo, dentro de la región considerada, el tiempo de viaje promedio para septiembre de 2018 fue de 4.2 días con un factor de viento del 0% y de 3.1 días con un factor de viento del 3%. Los tiempos de viaje promedio más largos (4.2-4.5 días) ocurrieron en enero de 2019.

6.3.4. Regiones probables de arribo del sargazo localizado en mar abierto

El sargazo en el suroeste del Caribe mexicano generalmente arribó en latitudes al sur de Ascensión (<19.75°N), mientras que el sargazo localizado inicialmente más al norte y más cerca de la costa

generalmente arribó en latitudes al norte de Ascensión ($>19.75^{\circ}\text{N}$); estos patrones fueron consistentes durante todos los meses estudiados (Fig. 23). Asimismo, las isobandas de latitud de arribo (Fig. 23) brindan una estimación del recorrido que siguió el sargazo desde el mar abierto hasta llegar a tierra. Es interesante notar que las isobandas de latitud que atraviesan una sección, e.g., un transecto de determinada longitud en el mar abierto, eventualmente bañarán un mayor intervalo de longitud de la línea de costa. Por ejemplo, para el caso de septiembre de 2018 (Fig. 23), las isobandas de latitud de arribo de los 19°N a 20°N atraviesan un transecto de ~ 50 km y orientación SSO-NNE ubicado enfrente y a lo largo de Banco Chinchorro; las partículas virtuales que siguieron dichas isobandas eventualmente llegaron a una sección costera de ~ 150 km. Para el caso de enero de 2019, las isobandas de latitud de arribo de los 19.5°N a 20.25°N atraviesan un transecto de ~ 40 km y orientación O-E ubicado sobre el Banco Chinchorro y una parte del canal de Chinchorro; dichas isobandas eventualmente bañarán ~ 100 km de costa. Para el caso de abril de 2019, las isobandas de latitud de arribo de los 19.25°N a 20.25°N atraviesan un transecto de ~ 50 km y orientación O-E ubicado sobre el norte de Banco Chinchorro; dichas isobandas eventualmente bañarán ~ 150 km de costa.

6.3.5. Conos de incertidumbre de trayectorias

Dado que los resultados del modelo fueron más sensibles al factor de viento, cuyo valor real no se conoce de antemano, se construyeron conos de incertidumbre de trayectoria a partir de los valores más probables para el factor de viento (1%, 2% y 3%) (Fig. 24). Es posible observar que a medida que aumenta la distancia a la región de destino, la incertidumbre en las trayectorias de viaje estimadas también aumenta. En otras palabras, las diferencias entre considerar distintos factores de viento se hacen más evidentes con trayectorias más largas. Para el caso de septiembre de 2018, se requirieron de conos de incertidumbre más estrechos y mejor definidos; a 120 km de la costa los

conos tienen una apertura de $\sim 0.25^\circ$ (distancia de separación entre las trayectorias calculadas con factores de viento de 1% y 3%) (Fig. 24). Para enero y abril de 2019, los conos de incertidumbre muestran una apertura similar ($\sim 0.25^\circ$), aunque también se observan más caóticos o poco definidos. También se observa que las trayectorias con un menor factor de viento se asocian con viajes más lentos y menos directos, o perpendiculares, hacia la línea de costa.

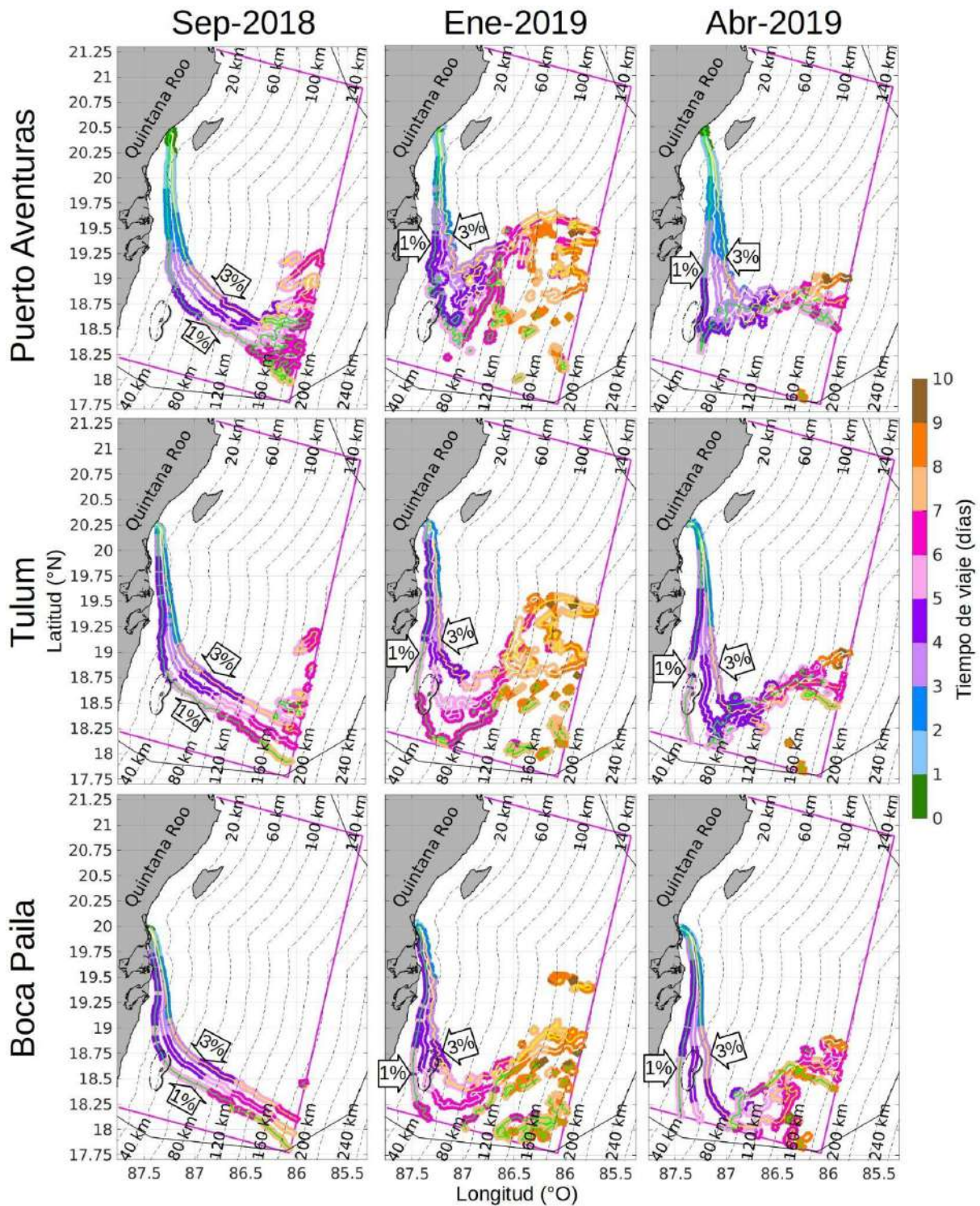


Fig. 24. Conos de incertidumbre de trayectoria del sargazo que arribó en tres regiones seleccionadas del Caribe mexicano durante septiembre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019. Los datos se extrajeron de las estimaciones mensuales de probabilidad de arribo, tiempo de viaje y

latitud de arribo del sargazo. Las trayectorias se muestran con una línea verde interna para el factor de viento del 1%, una línea blanca interna para el factor de viento del 2% y una línea amarilla interna para el factor de viento del 3%. Las flechas en el mapa también indican las trayectorias que se calcularon con un factor de viento de 1% o 3%, respectivamente.

6.3.6. Rutas de dispersión del sargazo que arribó al Caribe mexicano

Las rutas de viaje calculadas hacia atrás en el tiempo (Fig. 25), correspondientes a las partículas que se sembraron a lo largo de la línea de costa, respaldan que el sargazo que arriba en el Caribe mexicano vino del sureste, viajando con la Corriente Caimán y eventualmente con la Corriente de Yucatán (Fig. 5), mientras que es arrastrado hacia el oeste por los vientos de la región (Fig. 4). La zona cercana al Banco Chinchorro (Fig. 25) se muestra frecuentemente transitada por partículas con alta probabilidad de arribar al Caribe mexicano. En septiembre de 2018, las partículas parecen atravesar Banco Chinchorro principalmente desde el este, mientras que en abril de 2019 las partículas parecen atravesar Banco Chinchorro principalmente desde el sur. Dado que las partículas en estos experimentos se rastrearon por un máximo de 7 días, el contorno exterior de las plumas de dispersión (Fig. 25) revela de qué tan lejos pudo haber venido el sargazo que arribó al Caribe mexicano y que estuvo a la deriva durante una semana. No obstante, lo anterior es afectado por el factor de viento que se use, pues las distancias de dispersión aumentan al considerar factores de viento mayores (Fig. 25).

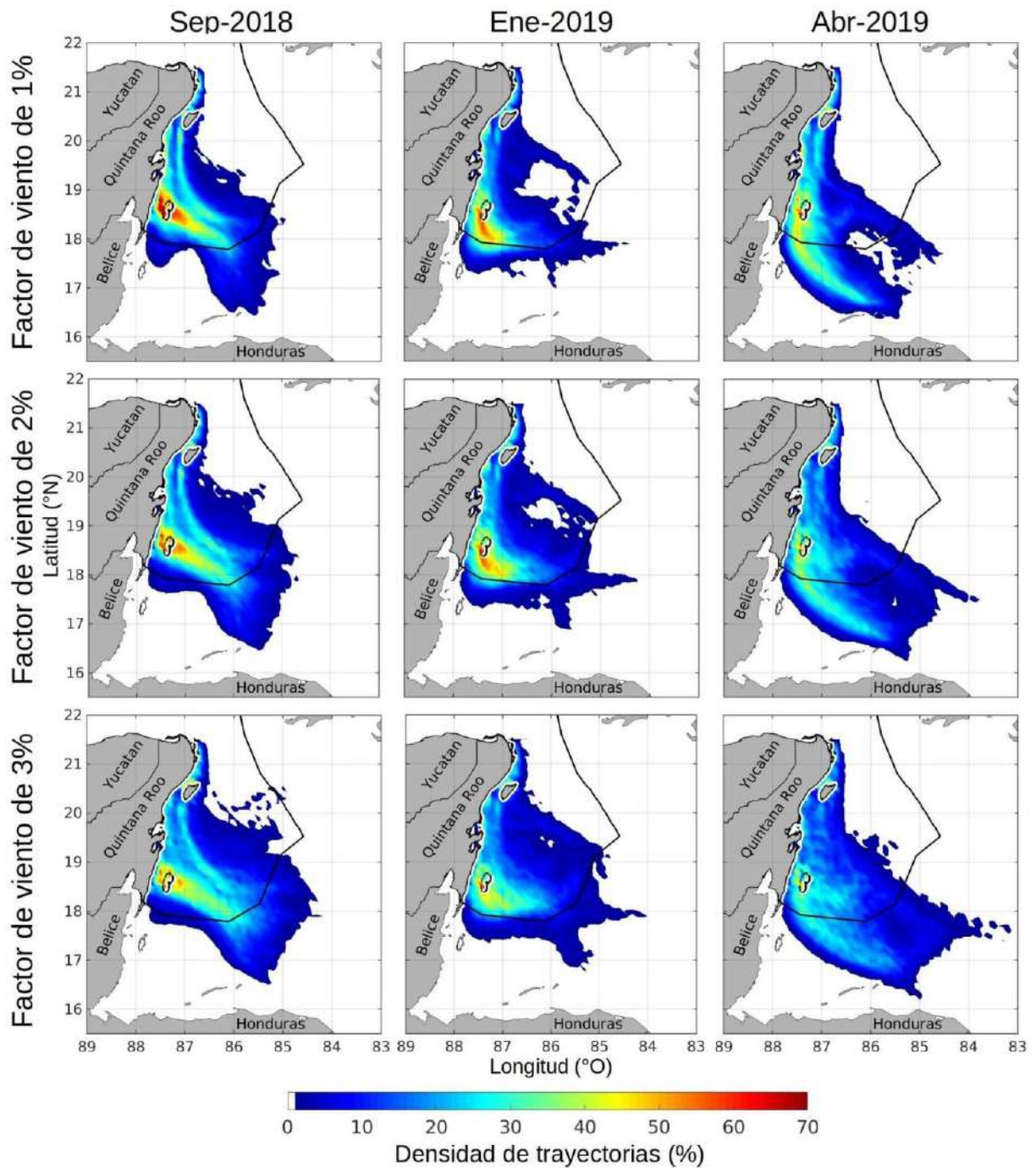


Fig. 25. Densidad de las trayectorias de 7 días del sargazo que potencialmente arribó al Caribe mexicano durante septiembre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019, según diferentes factores de deriva (1%, 2% y 3% de la velocidad del viento). Se liberaron partículas virtuales diariamente en la costa de Quintana Roo y se retrotrajeron durante 7 días. Los resultados utilizaron corrientes

superficiales del HYCOM global y vientos de la reanálisis ERA5. La línea negra gruesa delimita el Caribe mexicano. La línea blanca delgada a lo largo de la costa indica que los procesos de arribo a pequeña escala no se tuvieron en cuenta en el modelo.

6.3.7. Diferencias entre el flujo de la corriente y el del sargazo debidas al viento

La resta de la probabilidad de arribo con un factor de viento del 0% menos la probabilidad de arribo con factores de viento del 1%, 2% y 3% (Fig. 26) revela las regiones oceánicas desde donde es más probable que el sargazo haya sido arrastrado por los vientos para arribar en el Caribe mexicano. Por ejemplo, los vientos del este ayudaron al sargazo al norte de $\sim 20.5^{\circ}\text{N}$ (Puerto Aventuras), y a menos de ~ 20 km de la costa, a arribar en la costa en el Caribe mexicano. Sin arrastre por viento en esta región, dicho sargazo hubiera tenido menor probabilidad de arribar al norte del Caribe mexicano. También es evidente que conforme se usan factores de viento mayores (i.e., los vientos son más intensos) aumenta la probabilidad de que el sargazo arribe en el área de estudio, incluso viniendo desde regiones más lejanas (Fig. 26). Las regiones amarillas al lado derecho de las regiones rojas (i.e., en el noroeste del Caribe mexicano) indican que el sargazo en aguas del noroeste del Caribe mexicano no arribó en la región sin importar si se consideró o no arrastre por viento con un factor de viento de hasta 3%.

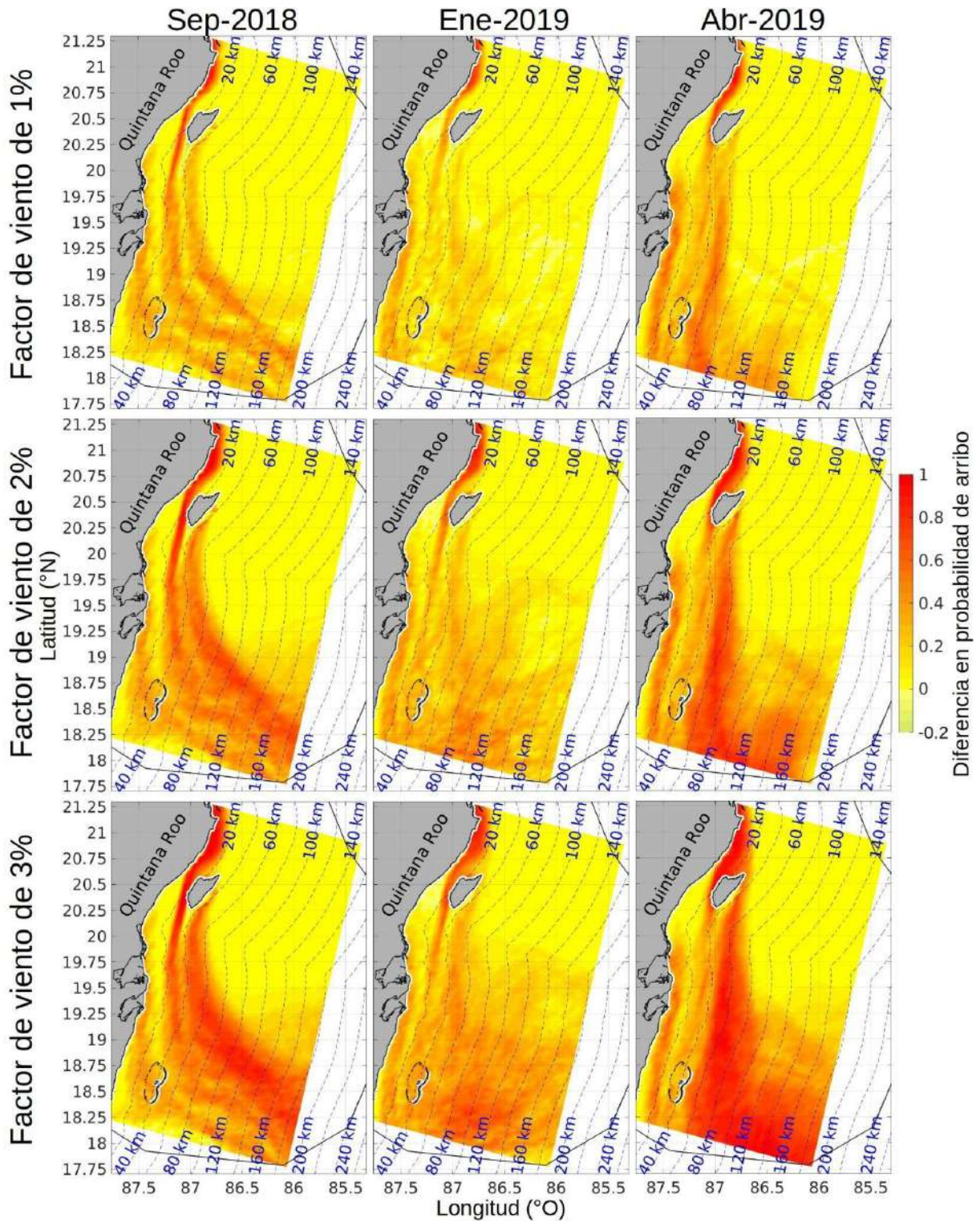


Fig. 26. La diferencia entre la probabilidad de arribo utilizando un factor de viento del 1%, 2% o 3% de la rapidez del viento menos la probabilidad de arribo utilizando un factor de viento del 0%,

durante septiembre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019. Los resultados utilizaron las corrientes superficiales de la HYCOM global y los vientos del análisis ERA5. El sargazo en las áreas más intensamente rojas tiene más probabilidades de arribar en el Caribe mexicano debido al arrastre del viento. Las líneas discontinuas indican la distancia (en km) al punto más cercano de la costa. La línea negra gruesa delimita el Caribe mexicano. La línea blanca delgada a lo largo de la costa indica que los procesos de arribo a pequeña escala no se tuvieron en cuenta en el modelo.

6.4. Discusión

6.4.1. Potencial de arribo a lo largo del Caribe mexicano

Los mayores porcentajes de arribo ocurrieron principalmente en septiembre de 2018 (e.g., el 43% con un factor de viento del 2%) (Fig. 22). En contraste, los menores porcentajes de arribo ocurrieron principalmente en enero de 2019 (e.g., el 33% con un factor de viento del 2%). Estas diferencias mensuales en el porcentaje de arribo son consistentes con la estacionalidad de los vientos en la región. Durante enero de 2019 (invierno), los vientos del noreste fueron más frecuentes que durante los meses no invernales, y se produjeron nortes transitorios pero intensos (Fig. 3). Estos vientos debilitan el flujo de sargazo hacia la costa (García-Sánchez et al., 2020). Durante septiembre de 2018 (verano/otoño), los nortes estuvieron ausentes, o fueron menos frecuentes, y los vientos del este fueron dominantes (Fig. 3), empujando el sargazo hacia las costas.

La costa del Caribe mexicano, entre Tulum (~ 20.75°N) y Puerto Morelos (~ 20.75°N), fue la más propensa al arribo de sargazo (Fig. 22). A gran escala, esto podría explicarse por dos factores principales: 1) la orientación de la costa dentro de este rango de latitud, lo que provoca una mayor interacción entre el continente y el flujo de la Corriente de Yucatán hacia el norte, y 2) la presencia de la isla de Cozumel, que actúa como una gran región que recibe y/o desvía sargazo,

principalmente mediante su costa este. Estas simulaciones concuerdan con la evidencia satelital de que la abundancia de sargazo frente a estas costas ha sido mayor dentro de este rango de latitud (Uribe-Martínez et al., 2022), y respaldan la idea de que la orientación de la costa y flujos de gran escala (i.e., vientos alisios, vientos del norte, la Corriente de Yucatán y la Corriente Caimán) son los principales determinantes de la distribución de sargazo a lo largo de las costas del Caribe mexicano.

Los porcentajes de arribo disminuyeron al norte de Puerto Morelos (al norte de $\sim 20.9^{\circ}\text{N}$) (Fig. 22), lo cual es consistente con tres escenarios a gran escala principales: 1) la orientación de la costa presenta menos oposición al flujo de la Corriente de Yucatán hacia el norte, 2) la isla de Cozumel actúa como un escudo que protege la región continental más al norte del arribo de sargazo, y 3) la intensificación de la Corriente de Yucatán, que da lugar a la Corriente del lazo, transportando rápidamente propágulos hacia el Golfo de México (Lara-Hernández et al., 2019). A una menor escala, es probable que las playas de Cancún y zonas aledañas presenten una menor acumulación de sargazo debido a la falta de una barrera arrecifal en esa zona (Cerdeira-Estrada et al., 2022), lo cual propicia un mayor oleaje y condiciones dinámicas de remoción natural (Rutten et al., 2021; Uribe-Martínez et al., 2022). Datos satelitales y mediciones *in situ* confirman que el arribo de sargazo es relativamente bajo al norte de Punta Nizuc (Rodríguez-Martínez et al., 2022; Uribe-Martínez et al., 2022). Más al norte, en costas de Cancún y zonas vecinas (alrededor de los 21.25°N), se observó un aumento relativo (Fig. 22) que normalmente no se observa (Uribe-Martínez et al., 2022), y puede estar relacionado con la forma en que se sembraron las partículas virtuales: la isla de Cozumel parece actuar como un escudo que disminuye el arribo de sargazo al norte de Punta Nizuc (ver latitudes de arribo en Fig. 23), pero partículas virtuales se sembraron diariamente en la región marina que debería de estar con poco sargazo debido a la presencia de la

isla de Cozumel (ver isobandas de latitud de arriba de 21.25°N en Fig. 23). Esto no refleja una deficiencia del modelo, sino que la forma de sembrar partículas virtuales es muy importante, y estas no se sembraron de forma realista en los experimentos numéricos que dieron lugar a las figuras 22 y 23.

El arribo de partículas virtuales fue considerablemente menos frecuente entre el norte de Puerto Morelos ($\sim 20.9^{\circ}\text{N}$) y Punta Nizuc ($\sim 21^{\circ}\text{N}$) (Fig. 22). Sin embargo, Rodríguez-Martínez et al. (2022) y Uribe-Martínez et al. (2022) reportan altas abundancias de sargazo en esta región, aunque menores que entre Tulum ($\sim 20.25^{\circ}\text{N}$) y Puerto Morelos ($\sim 20.75^{\circ}\text{N}$) (Uribe-Martínez et al., 2022). El bajo arribo estimado entre Puerto Morelos y Punta Nizuc podría estar relacionado con la resolución del modelo, que no permite una representación detallada de la morfología costera y la dinámica a pequeña escala (Dauhajre et al., 2019). Por ejemplo, el flujo costero a través del canal de Yucatán probablemente no es lo suficientemente realista, lo que podría dificultar que las partículas virtuales arriben entre Puerto Morelos y Punta Nizuc. Además, características al norte de Puerto Morelos, como cambios en la orientación de la costa, el ensanchamiento de la plataforma continental y un prominente cabo, es decir, Punta Nizuc, podrían favorecer la dinámica del transporte en dirección perpendicular a la costa (e.g., eddies), pero estas características están representadas de manera deficiente en el modelo. Se ha informado que características costeras similares inducen la formación del remolino (eddy) Ascensión-Cozumel (Carrillo et al., 2015). Se deben utilizar modelos costeros de alta resolución para estudiar la dinámica relacionada con el arribo de sargazo entre Puerto Morelos y Punta Nizuc. Lo anterior no implica que el modelo sea incapaz de predecir mucho arribo entre Puerto-Morelos y Punta Nizuc, pues simulaciones de seguimiento de sargazo detectado el 15-sep-2018 y 5-ene-2019 sí predijeron mucho arribo en dicha zona (Capítulo 7; Fig. 29). Es importante destacar que la comparación entre lo reportado en Uribe-

Martínez et al. (2022) y las estimaciones del modelo (Fig. 22) no constituyen una validación del mismo, pues Uribe-Martínez et al. (2022) analizan una condición climatológica basada en la distribución de sargazo detectada satelitalmente, mientras que en este capítulo se hicieron análisis mensuales no climatológicos basados en una distribución idealizada de partículas virtuales (uniforme a lo largo del dominio).

El crecimiento modelado del sargazo fue ligeramente diferente durante los meses estudiados (Fig. 22), siendo un poco mayor en enero de 2019. Durante este mes, considerando un factor de viento del 2%, el porcentaje de arribo fue del 33% sin crecimiento y del 37% con crecimiento (Fig. 22). Esto significa que aproximadamente el 11% de la biomasa de sargazo que arribó en las costas del Caribe mexicano durante enero de 2019 se generó a lo largo de las trayectorias de viaje de las partículas virtuales. El efecto de crecimiento más pequeño ocurrió en septiembre de 2018 con un factor de viento del 3%: el porcentaje de arribo fue del 48% sin crecimiento y del 51% con crecimiento (Fig. 22). Por lo tanto, el 6% de la biomasa de sargazo que arribó al Caribe mexicano durante septiembre de 2018 se generó a lo largo de las trayectorias de viaje de las partículas virtuales. Estos resultados deben de tomarse con cautela, considerando que el modelo aquí usado constituye una primera aproximación (ver Capítulo 4) para estimar el crecimiento del sargazo en función del estado trófico del agua de mar (inferido a partir de concentraciones satelitales de clorofila-a y asumiendo una respuesta inmediata del sargazo a la concentración de nutrientes) y de tasas de crecimiento reportadas en Lapointe et al. (2014). No se consideró el posible efecto de reservas internas de nutrientes o de mecanismos internos del ciclo de vida; tampoco se modelaron procesos de mortalidad como hundimiento por oleaje, senescencia, herbivoría o crecimiento de epífitas calcáreas (Jouanno et al., 2021). Los resultados a partir del modelo simplificado de crecimiento permiten vislumbrar que la mayor parte de la biomasa de sargazo que arriba al Caribe

mexicano no se generó por nutrientes locales, y que el Caribe mexicano no es un principal proveedor de nutrientes para la proliferación masiva de las mareas doradas.

6.4.2. Probabilidades de arribo del sargazo localizado en mar abierto

El sargazo que tenía mayor probabilidad de arribar en el Caribe mexicano se encontraba en aguas cercanas a la costa (≤ 20 km mar adentro) o hasta 100 km mar adentro en el sur del Caribe mexicano, al sur de $\sim 19^\circ\text{N}$ (Fig. 23). Por otro lado, el sargazo ubicado a más de ~ 50 km mar adentro en el noreste del Caribe mexicano, al norte de Punta Herrero ($> 19.5^\circ\text{N}$), tenía poca probabilidad de arribar en la región. Lo anterior se aplicaría para condiciones atmosféricas y oceánicas típicas, similares a las observadas durante los meses de estudio (Fig. 4; Fig. 5), ya que si ocurren eventos atmosféricos y oceánicos extremos, como tormentas o huracanes, el sargazo podría ser transportado de una manera muy diferente. Por ejemplo, Aguilera-Méndez et al. (2023) sugieren que sargazo en el noreste del Caribe mexicano fue transportado hacia las costas del norte del Caribe mexicano como consecuencia del paso de un huracán.

Durante septiembre de 2018, una zona más extensa del Caribe mexicano mostró mayor probabilidad de funcionar como fuente de sargazo para las costas del Caribe mexicano. En contraste, durante enero de 2019, el área con alta probabilidad de ser una fuente de sargazo era más pequeña y estaba más cercana a la costa (Fig. 23; Fig. 25). La forma del área marina que con mayor probabilidad proporciona sargazo a las costas del Caribe mexicano es consistente con el flujo de las Corrientes Caimán y de Yucatán: durante septiembre de 2018, la Corriente Caimán fluía sobre el Banco Chinchorro, mientras que durante enero de 2019 fluía al sur del Banco Chinchorro (Fig. 5). Otros estudios también han señalado la importancia de la latitud de flujo de la Corriente Caimán

para modular el transporte de organismos en la región, tales como larvas de especies arrecifales (Carrillo et al., 2015, 2017; Martínez et al., 2019).

6.4.3. Tiempos probables de viaje del sargazo que arribará al Caribe mexicano

El tiempo de viaje de las partículas que arribaron fue generalmente más corto para las partículas más cercanas a la costa (Fig. 23), mientras que este se incrementó a 7-8 días para las partículas a ~160 km de la costa. Otros estudios también indican que los tiempos de viaje pueden disminuir si la localidad destino está más cerca, aunque esto con frecuencia no ocurre así, pues depende de la rapidez y dirección de las corrientes que conectan los sitios, siendo asimétricos los tiempos de viaje (Siegel et al., 2003; Shanks, 2009; Lara-Hernández, 2012; Lara-Hernández et al., 2019). En el Caribe mexicano, los tiempos de viaje disminuirían para el sargazo localizado tanto en zonas de vientos del este más intensos como en el intenso núcleo de la Corriente de Yucatán, sobre todo en la parte norte del Caribe mexicano, que es la zona donde se intensifica dicha Corriente. También es de esperarse una variabilidad temporal en los tiempos. Por ejemplo, los tiempos de viaje promedio más largos (4.2-4.5 días) ocurrieron en enero de 2019. Durante este mes de invierno, los vientos más frecuentes del norte, combinados con la disminución de los vientos del este (Fig. 3; Fig. 4), ralentizaron el viaje de las partículas hacia la costa. En consecuencia, una mayor proporción de sargazo habría tenido tiempo para “esquivar” la península de Yucatán, fluyendo hacia el norte con la Corriente de Yucatán y eventualmente con la Corriente del Lazo (Lara-Hernández et al., 2019).

Al promediar el tiempo de viaje de todas las partículas dentro del dominio, se obtuvo un tiempo de viaje promedio de 3.8 días. Esto muestra que un sistema de pronóstico de arribo de sargazo en el Caribe mexicano, que use un dominio como el de esta investigación, podría emitir

alertas de arribo con una anticipación de ~4 días en promedio. Webster y Linton et al. (2013) documentan que predicciones con pocos días de anticipación han sido muy valiosas para planear y eficientizar estrategias de retención, recolección y mitigación de arribos masivos de sargazo. Por otro lado, extender la antelación de las predicciones implicaría aumentar la incertidumbre asociada a las mismas (Fig. 24); sería necesario buscar un equilibrio entre la proyección temporal de la predicción y la precisión deseada.

6.4.4. Regiones probables de arribo del sargazo localizado en mar abierto

Las isolíneas de arribo (Fig. 23) brindan una estimación del recorrido más probable que puede seguir el sargazo, la cual es consistente con la idea de que el sargazo fluye con las corrientes de Caimán y Yucatán, pero es empujado hacia la costa por los vientos alisios. A medida que los vientos del este se intensifican o aumenta el factor de viento, el transporte de sargazo sería más directo hacia la costa, provocando una mayor acumulación de sargazo en esa zona. Rutten et al. (2021), usando video-monitoreo de deposición y remoción de sargazo en la playa de Puerto Morelos, reportan que el sargazo se deposita sobre las playas usualmente durante condiciones de viento y oleaje poco intensos. Lo anterior revela que el efecto del viento sobre el transporte y arribo de sargazo es diferencial dependiendo si la macroalga se ubica en aguas de mar abierto o dentro de lagunas arrecifales. Las intensificaciones del viento acercarán más sargazo hacia la costa, pero este se depositará en la playa si el viento no es demasiado intenso. Sería interesante determinar la magnitud del viento que en general cause un mayor arribo de sargazo en las costas del Caribe mexicano, aunque esta es una tarea complicada pues implica acoplar modelos de transporte oceánicos con modelos de transporte muy costeros, y considerar efectos de hundimiento de sargazo

por oleaje. Consistente con lo anterior, Uribe-Martínez et al. (2022) señalan que el transporte y arribo de sargazo involucran procesos complejos que operan a diferentes escalas.

El sargazo que fluyó por Banco Chinchorro eventualmente se dispersó hacia una región extensa de la costa del Caribe mexicano (Fig. 23). Esta es una observación importante para prevenir arribos en el Caribe mexicano, pues si se recolecta sargazo lo largo de un transecto con la correcta orientación sobre o cerca de Banco Chinchorro, se estarán evitando arribos a una región más extensa de la línea de costa, con 3 a 6 días de anticipación (Fig. 23). Por lo general, todo el sargazo que pasó por Banco Chinchorro mostró una probabilidad muy alta de arribar al Caribe mexicano (Fig. 23), así que recolectar sargazo por Banco Chinchorro será un esfuerzo que casi siempre valdrá la pena. Monitorear la región de Banco Chinchorro también permitiría dar avisos de arribo (con 3 a 6 días de anticipación) para que la población en tierra tome las medidas pertinentes. Naturalmente, tomar medidas en la región de Banco Chinchorro no será suficiente para solucionar el problema del sargazo a lo largo de toda la costa del Caribe mexicano (la región del Canal de Cozumel prácticamente no sería directamente beneficiada), pero sí contribuiría para cuidar la salud de ecosistemas costeros en la región que no es de mayor atractivo turístico. Por otro lado, recolectar sargazo a lo largo de transectos de ~50 km es todo un reto pues dicha distancia es enorme como para ser atendida por barcos, con o sin barreras, que busquen detener o concentrar sargazo. El problema del sargazo en México y el mundo es complejo, y aún demanda mucha investigación y financiamiento para resolverse.

6.4.5. Conos de incertidumbre de trayectorias

Dado que los resultados del modelo fueron más sensibles al factor de viento, cuyo valor real no se conoce de antemano, se construyeron conos de incertidumbre de trayectoria a partir de los valores

más probables para el factor de viento (1%, 2% y 3%). En otros estudios se ha usado un factor de viento de 0.5% (Berline et al., 2020; Johnson et al., 2020; Marsh et al., 2022), y estudios de gran escala, e.g., climatológicos o para toda la cuenca del Noratlántico, suelen emplear un factor de viento de 1% (e.g., Putman et al., 2018; Johns et al., 2020; Marsh et al., 2021). Para estudios como este, de menor escala espacio-temporal, es más probable que el factor de viento de 1% no sea siempre el mejor, pues podría variar en función del espesor y densidad de las balsas de sargazo observadas en determinado momento en el Caribe mexicano. Putman et al. (2020) encontraron que factores de viento de 1% a 3% pueden mejorar las predicciones de transporte de sargazo en una región relativamente pequeña en el norte del Caribe. Por lo tanto, en este trabajo se construyeron conos de incertidumbre a partir de dichos factores de viento; sin embargo, aún se requiere de investigación para determinar qué factores de viento son más apropiados para la región, e incluso se podrían investigar nuevas formas menos empíricas para modelar el efecto de arrastre del viento sobre el sargazo.

Las diferencias entre considerar diferentes factores de viento se hicieron más evidentes conforme aumentó el tiempo recorrido por las partículas virtuales. Es decir, la incertidumbre en la estimación de las trayectorias de viaje aumenta al estimar trayectorias de viaje más largas. Los conos de incertidumbre usados para predecir la trayectoria de huracanes también se ensanchan conforme aumenta la proyección temporal del pronóstico, llegando a asociarse con incertidumbres de decenas o centenas de kilómetros (Broad et al., 2007; Cox et al., 2013). La incertidumbre asociada a las trayectorias también parece depender de las condiciones oceánicas y atmosféricas; por ejemplo, en septiembre de 2018 se observan conos de incertidumbre más estrechos y mejor definidos (Fig. 24), probablemente porque hubo una menor variabilidad de los vientos durante esos meses (condiciones atmosféricas más estables) (Fig. 3). Adicionalmente, los modelos de circulación

parecen tener una mayor incertidumbre al modelar condiciones atmosféricas más caóticas y/o extremas (Emanuel, 2017; Torres et al., 2018; Abdolali et al., 2021).

6.4.6. Rutas de dispersión del sargazo que arribó al Caribe mexicano

Al analizar la densidad de las rutas de dispersión (Fig. 25) en el contexto de la circulación atmosférica (Fig. 4) y oceánica (Fig. 5), se hizo evidente que el sargazo que arriba en el Caribe mexicano fluyó junto con la Corriente Caimán y eventualmente con la Corriente de Yucatán, mientras que los vientos alisios lo arrastraron hacia la costa oriental de la Península de Yucatán. No obstante, hubo variaciones en el flujo de partículas por Banco Chinchorro; a veces fluyeron desde el este (e.g., en septiembre de 2018) y a veces desde el sur (e.g., en abril de 2019) (Fig. 25), lo cual se debe a que el núcleo de la Corriente Caimán fluye a lo largo de una latitud que varía en el tiempo. Otros estudios ya han destacado que la dispersión larvaria y conectividad en la región del Sistema Arrecifal Mesoamericano son modulados de forma importante por la latitud a la cual se encuentra la Corriente Caimán con la parte oriental de la Península de Yucatán: en la región de encuentro, se generan remolinos y corrientes más débiles que favorecen retención, mientras que al norte de la región de encuentro se intensifica la corriente, dando origen a la Corriente de Yucatán, que favorece advección de larvas (Carrillo et al., 2015, 2017; Martínez et al., 2019). Para el caso del sargazo, tal vez lo anterior no funciona exactamente igual; por ejemplo, estructuras hidrodinámicas de retención pueden tener un menor efecto sobre la macroalga que, al sobresalir en superficie, también es arrastrada por el viento. Futuros trabajos numéricos podrían ayudar a entender y cuantificar el efecto de retención de sargazo en el Caribe Mexicano debido a estructuras hidrodinámicas en interacción con el arrastre debido al viento.

6.4.7. Diferencias entre el flujo de la corriente y el del sargazo debidas al viento

La sustracción de la probabilidad de arribo con un factor de viento del 0% de la probabilidad de arribo con factores de viento del 1%, 2% y 3% (Fig. 26) reveló las regiones oceánicas desde donde es más probable que el sargazo arribe al Caribe mexicano influenciado por los vientos. Por ejemplo, los vientos del este ayudaron al sargazo al norte de $\sim 20.5^{\circ}\text{N}$ (Puerto Aventuras), y a menos de ~ 20 km de la costa, a arribar a las costas del Caribe mexicano. Debido a que la Corriente de Yucatán es más rápida en esta región, se necesitan vientos alisios más intensos para desviar el sargazo hacia la costa. Asimismo, con la intensificación de los vientos alisios (aumentando el factor de viento), es más probable que el sargazo mar adentro arribe en el Caribe mexicano. La intensificación del viento también podría beneficiar el crecimiento del sargazo al inducir mezcla y, por lo tanto, la disponibilidad de nutrientes (Palter, 2015; Rumyantseva et al., 2015). Por otro lado, los vientos tormentosos podrían hacer que el sargazo se hunda temporal o permanentemente; la caracterización y parametrización numérica del efecto del viento sobre el sargazo aún es un tema de frontera y debate (Putman y Hu, 2022; Sosa-Gutiérrez et al., 2022).

6.5. Conclusión

En este estudio se analizó, en la escala mensual, el transporte y el potencial de arribo de sargazo en el Caribe mexicano, bajo el escenario hipotético de que el sargazo se distribuyera de manera uniforme en las aguas del Caribe mexicano. De los cuatro meses estudiados, los mayores porcentajes de arribo ocurrieron en septiembre de 2018, mientras que los menores se registraron en enero de 2019. Estas diferencias en el porcentaje de arribo son consistentes con la estacionalidad de los vientos en la región, ya que los vientos del norte típicos de invierno (e.g., enero) inhiben el arribo de sargazo en el Caribe mexicano. La costa del Caribe mexicano entre Tulum y Puerto Morelos fue la más propensa a los arribos de sargazo, lo que se explica por (a) la orientación de la costa dentro de este rango de latitud, la cual causa una mayor interacción entre el continente y el

flujo de la Corriente de Yucatán hacia el norte, y (b) por la presencia de la isla de Cozumel, cuyo flanco este actúa como una gran región receptora de sargazo. El arribo de sargazo disminuyó al norte de Punta Nizuc, lo cual es consistente con (a) la orientación de la costa que presenta menos oposición al flujo de la Corriente de Yucatán hacia el norte, (b) la isla de Cozumel que actúa como un escudo protector de las costas del extremo norte del Caribe mexicano y (c) la intensificación de la Corriente de Yucatán que transporta rápidamente propágulos hacia el Golfo de México.

El sargazo que se encontró en aguas del sur del Caribe mexicano o ya muy cerca de la costa (<10 km) fue el que arribó en la región, generalmente en menos de 5 días, mientras que el sargazo localizado en aguas del noreste del Caribe mexicano ingresó al Golfo de México en vez de arribar localmente. Las rutas de dispersión muestran que el sargazo que arribó al Caribe mexicano fluía hacia el oeste con la Corriente Caimán y eventualmente hacia el norte con la Corriente de Yucatán, mientras que los vientos del este lo empujaban hacia las costas. Aunque es posible estimar las trayectorias que sigue el sargazo, hay un grado de incertidumbre considerable que se asocia principalmente con el factor de viento (no se sabe *a priori* qué factor de viento es el más adecuado). Por lo anterior, se sugiere calcular conos de incertidumbre de trayectorias en donde los bordes del cono están definidos por las trayectorias considerando factores de viento de 1% y 3%. La incertidumbre en función del factor de viento disminuye conforme se estiman trayectorias más cortas, de forma tal que se puede saber con mayor seguridad la región de arribo del sargazo que está más cerca de la costa y que tardará menos tiempo en arribar.

Los resultados del estudio proporcionan información útil para el desarrollo de estrategias de prevención y mitigación de arribos, como la instalación de barreras y la recolección de sargazo dirigida a zonas con alta probabilidad de afluencia de sargazo. Un resultado importante en este sentido es que la región al sur y este de Banco Chinchorro aparece como una fuente común del

sargazo que después de 3-7 días se dispersa a lo largo de la costa, con alta probabilidad de arribar entre 19°N y 20.5°N. Por lo tanto, cuando el núcleo de la Corriente de Yucatán fluye por Banco Chinchorro, se recomienda recolectar y monitorear sargazo en las cercanías de Banco Chinchorro para ayudar a mitigar y predecir eficientemente (con ~5 días de anticipación) arribos masivos a lo largo de una amplia sección de costa (~200 km) atractiva para el turismo.

Esta información espacialmente explícita representa la base para análisis futuros en conjunto con datos de patrones históricos de la presencia de sargazo en aguas del Caribe mexicano, contribuyendo con elementos clave para generar información multicriterio para la planeación en el manejo y respuesta ante arribazones de sargazo en esta región.

7° capítulo – Estimación del destino del sargazo detectado en momentos específicos

7.1. Introducción

Los problemas actuales que enfrentan muchas regiones costeras, incluida la del Caribe mexicano, debidos al crecimiento masivo del sargazo (van Tussenbroek et al., 2017; Rodríguez-Martínez et al., 2019; Chávez et al., 2020; Bartlett y Elmer, 2021; Resiere et al., 2021; Fraga y Robledo, 2022; Olguin-Maciél et al., 2022), demandan estudios y pronósticos locales de transporte y arribo que permitan planear acciones efectivas de prevención y mitigación, tales como la contención y recolección oportuna de sargazo (Webster y Linton, 2013; Oxenford et al., 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2022, 2023). Aunque lo anterior es una necesidad urgente (Hendy et al., 2021), aún son pocos los estudios y sistemas enfocados a analizar y predecir el destino del sargazo detectado a escala local, por ejemplo, en el Caribe mexicano (Uribe-Martínez et al., 2022; Cuevas et al., 2023). Este capítulo tiene como objetivo estimar el destino del sargazo que haya sido detectado en el Caribe mexicano en momentos específicos. Además, se espera que el método de predicción y la forma de presentación de los resultados aquí generados sirvan como referente para futuros sistemas locales de análisis y pronóstico de arribo de sargazo.

Algunos de los estudios que estiman la trayectoria y las regiones de arribo de sargazo detectado en el Caribe mexicano se mencionan a continuación:

Webster y Linton (2013) desarrollaron e implementaron el sistema SEAS de alerta temprana de arribo de sargazo, el cual originalmente operaba para las costas de Texas, EE. UU, pero actualmente se extendió a más regiones. Este sistema utiliza imágenes de Landsat para detectar balsas de sargazo en aguas cercanas a la costa, y estima si arribará en la región o no, dependiendo

de las corrientes y de los vientos imperantes. La predicción de los arribos puede tener hasta 14 días de anticipación, y se ha reportado exitosa en varios casos, lo cual ha permitido una mejor respuesta para el manejo de arribos masivos. Sin embargo, SEAS no utiliza algoritmos Lagrangianos de seguimiento de partículas, lo cual limita la precisión y detalle en las predicciones.

Maréchal et al. (2017) propusieron un método rápido para predecir, con hasta siete días de anticipación, el arribo de sargazo en las Antillas menores. El método consiste en utilizar la detección satelital (MODIS) de sargazo generada por el *Sargassum* Watch System (SaWS; <https://optics.marine.usf.edu/projects/saws.html>), sobreponerla a vectores de corrientes generadas con el pronóstico de HYCOM, y realizar una interpretación visual del posible destino de las balsas de sargazo que detectaron. Sin embargo, el método no considera arrastre de sargazo por viento ni utiliza algoritmos Lagrangianos de seguimiento de partículas, lo cual limita la precisión y detalle en las predicciones.

Putman et al. (2020) fijaron rastreadores GPS en balsas de sargazo y en boyas que asemejan sargazo para seguir sus trayectorias por un periodo de hasta 36 días, en la región del canal de la Mona, entre Puerto Rico y República Dominicana. Encontraron que el movimiento de sargazo domina de este a oeste (e.g., de Puerto Rico hacia República Dominicana) debido a la prevalencia de vientos alisios en la región. Además, indican que considerar arrastre de sargazo debido al viento, con un factor de viento entre 1% y 3%, permite mejorar las predicciones de transporte y arribo de sargazo generadas con modelos Lagrangianos.

Xu et al. (2022) trabajaron el sistema de pronóstico de sargazo del Caribbean Coastal Ocean Observing System (CariCOOS), el cual opera para la región de Puerto Rico y las Islas Vírgenes. Para predecir eventos de arribo de sargazo con ~5 días de anticipación, el sistema considera los índices satelitales AFAI (Índice Alternativo de Algas Flotantes) y MCI (Índice de Máxima

Clorofila) para inferir la posible presencia de sargazo, y usa mediciones de la superficie marina con radares de alta frecuencia, pronósticos de corrientes generados con el modelo FVCOM (Chen et al. 2003), y un algoritmo Lagrangiano de seguimiento de partículas con asimilación de datos. Sin embargo, el sistema no considera arrastre directo de sargazo debido al viento, y los índices AFAI y MCI tienen limitaciones para discriminar sargazo.

Bernard et al. (2022) analizaron el transporte del sargazo en las Antillas menores para predecir arribos en la zona. Ellos no consideran modelos Lagrangianos de seguimiento de partículas, sino que usaron métodos de aprendizaje automático para encontrar los tipos de circulación oceánica y atmosférica que más se asocian con los picos de arribo. Para el análisis consideraron observaciones de arribo de sargazo, detección satelital de sargazo cerca de la costa, vientos de ERA5 (con un factor de viento de 1%) y corrientes de los modelos HYCOM y Mercator. Encontraron que dos regímenes de corrientes particulares se presentan cuando los arribos de sargazo son más intensos.

Aguilera-Méndez et al. (2023) realizaron un pronóstico, a cinco días, de la trayectoria de viaje de sargazo detectado en el Caribe mexicano el 1 de julio de 2021, cuando el huracán Elsa se encontraba en la región. El sargazo lo identificaron satelitalmente a partir del MCI, y las trayectorias fueron calculadas con un modelo de transporte que emplea datos de vientos, mareas y oleaje generados con los modelos MM5, WRF, WaveWatch III, y SWAN.

El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT, UNAM) (Aguirre-Gómez, 2018) realiza rutinariamente detección satelital de sargazo en el Caribe mexicano con imágenes de Sentinel-2 (<http://sargazo.lanot.unam.mx/lanot/sargazo/>), y trabaja en un sistema de pronóstico de arribo de sargazo, acoplando modelos atmosféricos (GFS), oceánicos (HYCOM) y Lagrangianos. No obstante, el sistema continúa en desarrollo, requiere de evidencia científica que respalde su

validez, y necesita de una presentación e interpretación de resultados que facilite su uso para la toma de decisiones.

7.2. Métodos

7.2.1. Estimaciones de transporte y arribo

Se estimó el destino del sargazo que fue detectado (por Landsat-8) en el Caribe mexicano en fechas específicas (14 de agosto de 2018, 15 de septiembre de 2018, 5 de enero de 2019 y 11 de abril de 2019). Los tiempos de viaje y las coordenadas geográficas de arribo se calcularon como se describe en la sección (6.2), pero no se realizaron promedios mensuales porque las partículas se liberaron sólo un día de cada mes estudiado.

Se calcularon los rangos de incertidumbre de la biomasa de sargazo considerando las posibles coberturas y densidades mínimas y máximas de las balsas de sargazo. El límite inferior (e.g., ~0.2 T húmedas en un píxel de Landsat-8) se obtiene al asumir (a) que cada píxel de sargazo tiene una cobertura de sargazo de 180 m² (el 20% del área del píxel; Hu et al., 2015), y (b) que la densidad de las balsas de sargazo es de 1.26 kg húmedos/m² (Wang et al., 2018). El límite superior (e.g., ~6 T húmedas en un píxel de Landsat-8) se obtiene al asumir (a) que cada píxel de sargazo tiene una cobertura de sargazo de 900 m² (el 100% del área del píxel), y (b) que la densidad de las balsas de sargazo es de 6.74 kg húmedos/m² (Wang et al., 2018). Por lo tanto, el límite superior de la estimación de la biomasa fue aproximadamente 27 veces mayor que el límite inferior de la estimación de la biomasa.

Se obtuvo una aproximación de la biomasa de sargazo para cada vértice de la cuadrícula uniforme en el Caribe mexicano distribuyendo la biomasa de los píxeles de sargazo (Landsat-8) al vértice de la cuadrícula uniforme más cercano. Por ejemplo, un vértice de la cuadrícula uniforme

con 10 píxeles de sargazo representaba al menos ~ 2 T húmedas de sargazo (~ 0.2 T húmedas * 10). La biomasa de sargazo en los vértices de la cuadrícula con partículas que no arribaron al Caribe mexicano fue descartada. Como resultado, cada vértice de la cuadrícula uniforme se asoció con un tiempo de viaje, coordenadas geográficas de arribo y estimaciones de la biomasa del sargazo que arribó. Para obtener una idea gráfica del transporte de sargazo, se trazó el sargazo en las líneas de corrientes oceánicas más los vientos (factores de viento integrados del 1%, 2% y 3%) (Fig. 29). La biomasa arribada a lo largo de secciones de línea de costa dentro de rangos de latitud de 0.25° se estimó a partir de la biomasa de sargazo y el sitio de arribo correspondiente a cada vértice de la cuadrícula (Fig. 29).

7.2.2. Comparación de estimaciones del modelo con observaciones

Se compararon las distribuciones de sargazo estimadas mediante simulaciones con las detectadas por satélite. Las partículas se rastrearon durante 7 días y se liberaron en el momento y las coordenadas geográficas donde se detectó sargazo en imágenes de Landsat-8, de acuerdo con el método multi-índice de en Cuevas et al. (2018) y Uribe-Martínez et al. (2022) (Sección 4.2.2). Se utilizaron imágenes de satélite correspondientes a diferentes momentos y regiones iniciales y finales. Los momentos iniciales fueron el 7 de agosto de 2018, el 8 de septiembre de 2018, el 29 de diciembre de 2018 y el 4 de abril de 2019; la región inicial corresponde a la escena de Landsat-8 aproximadamente dentro de los 16.5 - 18.5° N y 86.5 - 84.5° W (experimentos preliminares de seguimiento de partículas mostraron que esta región puede proporcionar sargazo al Caribe mexicano en 7 días). Los momentos finales fueron el 14 de agosto de 2018, el 15 de septiembre de 2018, el 5 de enero de 2019 y el 11 de abril de 2019; la región final corresponde a las dos escenas de Landsat-8 sobre el Caribe mexicano (Fig. 27). Las partículas se advectaron utilizando los mismos parámetros que las ejecuciones anteriores (Tabla II). A partir de la distribución de las

partículas virtuales y de la distribución del sargazo observado satelitalmente en la región final, se construyeron matrices, con una resolución horizontal de $1/12^\circ$, de presencia/ausencia de partículas virtuales o sargazo, respectivamente. Luego se obtuvo el porcentaje de las celdas con partículas virtuales que también correspondían con celdas con sargazo observado satelitalmente (porcentaje de coincidencia). Por ejemplo, se consideró un 100% de coincidencia si todas las celdas con partículas virtuales se correspondieron con celdas que tenían sargazo detectado satelitalmente. A pesar de que enfoques de comparación como este pueden proporcionar una idea del rendimiento del modelo (Brooks et al., 2018; Kwon et al., 2019), no constituyen una validación concluyente porque las imágenes satelitales son insuficientes, por su frecuencia, para observar trayectorias detalladas de sargazo.

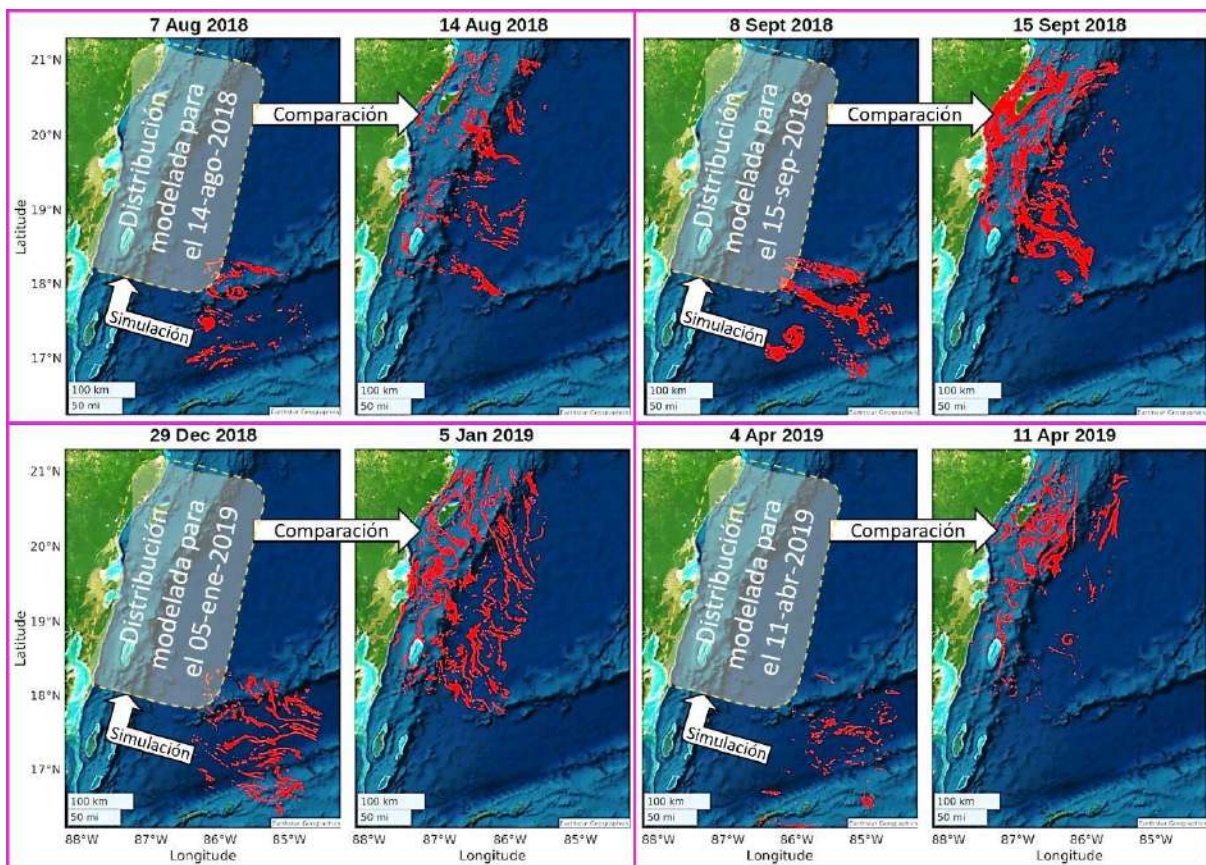


Fig. 27. Esquematación del procedimiento realizado para comparar la distribución de sargazo detectado satelitalmente con la distribución estimada por el modelo. Las partículas virtuales se sembraron en donde se detectó sargazo los días 7-ago-2018, 8-sep-2018, 29-dic-2018 y 4-abr-2019, y se advectaron por siete días. La distribución final de las partículas virtuales en el Caribe mexicano se comparó con la distribución de sargazo detectado satelitalmente los días 14-ago-2018, 15-sep-2018, 5-ene-2019 y 11-abr-2019. (●) Sargazo detectado satelitalmente.

Se compararon cualitativamente las estimaciones de arribo al norte de Tulum (~20.25°N) con los informes de la comunidad sobre la cantidad relativa de sargazo en las playas a lo largo de la costa (Fig. 28). Durante los eventos intensos de arribo, estos informes son generados diariamente por la Red de Monitoreo de Sargazo de Quintana Roo (<https://www.facebook.com/RedSargazo/>), y se basan en el monitoreo satelital, así como en la contribución ciudadana para la ciencia a través de colecciones de imágenes (fotografías tomadas en tiempo real por personas diversas a lo largo de las costas). La Red de Monitoreo de Sargazo de Quintana Roo emitió el primer boletín el 10 de febrero de 2019. Por lo tanto, esta fuente de información sólo está disponible para hacer comparaciones con los resultados de abril de 2019 de este estudio. Esta comparación cualitativa da una idea del desempeño y alcances del modelo, pero tampoco puede considerarse como una validación concluyente porque los informes (Fig. 28) carecen de validación científica, no determinan a escala fina, y pueden reflejar procesos naturales y artificiales de eliminación de sargazo (Rutten et al., 2020; Rodríguez-Martínez et al., 2023) que no son reproducidos por el modelo numérico.



Fig. 28. Cantidad relativa de sargazo arribado en el norte del Caribe mexicano, del 13 de abril de 2019 al 19 de abril de 2019. Boletines generados por la Red de Monitoreo de Sargazo de Quintana Roo (<https://www.facebook.com/RedSargazo/>).

7.3. Resultados

A continuación, se describen las estimaciones de transporte y arribo de sargazo de acuerdo con el modelo de seguimiento de partículas virtuales implementado en este estudio. Consultar el mapa del área de estudio (2° Capítulo; Fig. 3) como referencia a las localidades que se nombran.

7.3.1. Estimaciones para sargazo detectado el 14-ago-2018

Se estima que del sargazo detectado en el Caribe mexicano el 14 de agosto de 2018, al menos 4021 T arribaron a la región (Fig. 29). La línea de costa alrededor de Punta Herrero fue la que recibió una mayor cantidad de sargazo, el cual se detectó en distintas regiones del mar abierto. Por ejemplo, había sargazo al sur y oeste de Banco Chinchorro, el cual tardó entre 2 y 3 días para arribar cerca de Punta Herrero. Asimismo, una gran acumulación de sargazo a 140 km de la costa Xcalak (18.2°N , 86.5°O) arribó a la región de Punta Herrero tras 6-7 días de viaje. La línea de costa alrededor de 18.5°N también recibió cantidades considerables de sargazo, pues en la región marina alrededor de 18°N , 86.3°O se detectaron acumulaciones importantes de sargazo que tardaron 7-9 días en arribar cerca de 18.5°N . La línea de costa de Puerto Morelos, y zonas cercanas, también

recibió bastante sargazo. Parte de dicho sargazo se detectó en aguas a menos de 10 km de la costa, entre Puerto Aventuras y Puerto Morelos, y requirió menos de un día de viaje para arribar cerca de Puerto Morelos. Sargazo detectado alrededor de 19.1°N, 87.1°O también contribuyó significativamente con los arribos cerca de Puerto Morelos, empleando típicamente entre 2 y 3 días de viaje.

7.3.2. Estimaciones para sargazo detectado el 15-sep-2018

Se estima que del sargazo detectado en el Caribe mexicano el 15 de septiembre de 2018, al menos 28,150 T arribaron en la región (Fig. 29). La línea de costa al norte de Boca Paila, excluyendo el oeste de Cozumel, recibió las mayores cantidades de sargazo, el cual se detectó en distintas regiones del mar abierto. Por ejemplo, había mucho sargazo a menos de 20 km de la costa, desde Punta Herrero hasta Punta Nizuc, el cual requirió distintos tiempos de viaje (<1-6 días) para arribar en las diferentes zonas del norte del Caribe mexicano. Asimismo, al sur de Ascensión y a más de 40 km de la costa también había concentraciones de sargazo que arribaron esencialmente en el norte del Caribe mexicano tras 3-7 días de viaje. La línea de costa alrededor de 19.5°N y Punta Herrero también recibió mucho sargazo, parte del cual fue detectado en aguas al sur de 19.5°N y a menos de 40 km de la costa. La estimación de arribos disminuyó en la parte sur de la línea de costa (al sur de Punta Herrero) porque casi no se detectó sargazo en aguas del suroeste del Caribe mexicano.

7.3.3. Estimaciones para sargazo detectado el 05-ene-2019

Se estima que del sargazo detectado en el Caribe mexicano el 5 de enero de 2019, al menos 10,767 T arribaron a la región (Fig. 29). Regiones cercanas a la isla de Cozumel (Puerto Morelos, Puerto Aventuras y Cozumel este) recibieron una cantidad sobresaliente de sargazo, el cual se detectó en distintas zonas del mar abierto. Por ejemplo, se detectaron abundantes acumulaciones de sargazo,

entre 0 y 70 km mar adentro, enfrente de la línea de costa entre Ascensión y Punta Herrero: gran parte del sargazo detectado entre 10 y 40 km de la línea de costa arribó en Puerto Morelos y Puerto Aventuras tras 3-5 días de viaje, mientras que gran parte del sargazo detectado entre 40 y 70 km de la costa arribó en Cozumel-este tras 2-5 días de viaje. Al sur de 19°N también se detectaron grandes balsas de sargazo dispersas en una extensa región marina del sur del Caribe mexicano; se estima que dichas balsas arribaron cerca de Ascensión, Boca Paila y al norte de 20.3 °N. El sargazo detectado a menos de 10 km de la costa entre Ascensión y Mahahual usualmente arribó entre ~19°N y ~20 °N (Boca Paila) en menos de 3 días.

7.3.4. Estimaciones para sargazo detectado el 11-abr-2019

Se estima que del sargazo detectado en el Caribe mexicano el 11 de abril de 2019, al menos 5456 T arribaron a la región (Fig. 29). La línea de costa alrededor de la región de la isla de Cozumel fue la que recibió una mayor cantidad de sargazo, el cual se detectó en distintas regiones del mar abierto. Por ejemplo, al sur de 20.5°N y al este de 87°O había balsas de sargazo que arribaron en la costa oriental de Cozumel en menos de dos días. En la región del canal de Cozumel, frente a Tulum y Puerto Aventuras, se detectaron balsas de sargazo que se estima tardaron menos de dos días para arribar entre Tulum y Puerto Morelos. Asimismo, se detectaron balsas de sargazo entre Ascensión y Punta Herrero, a 20-40 km de la costa, las cuales arribaron entre Tulum y Puerto Morelos después de 2-3 días de viaje. También se detectaron balsas de sargazo entre Punta Herrero y Mahahual, a 20-40 km de la costa, las cuales se estima que arribaron entre Tulum y Puerto Morelos después de 3-5 días de viaje.

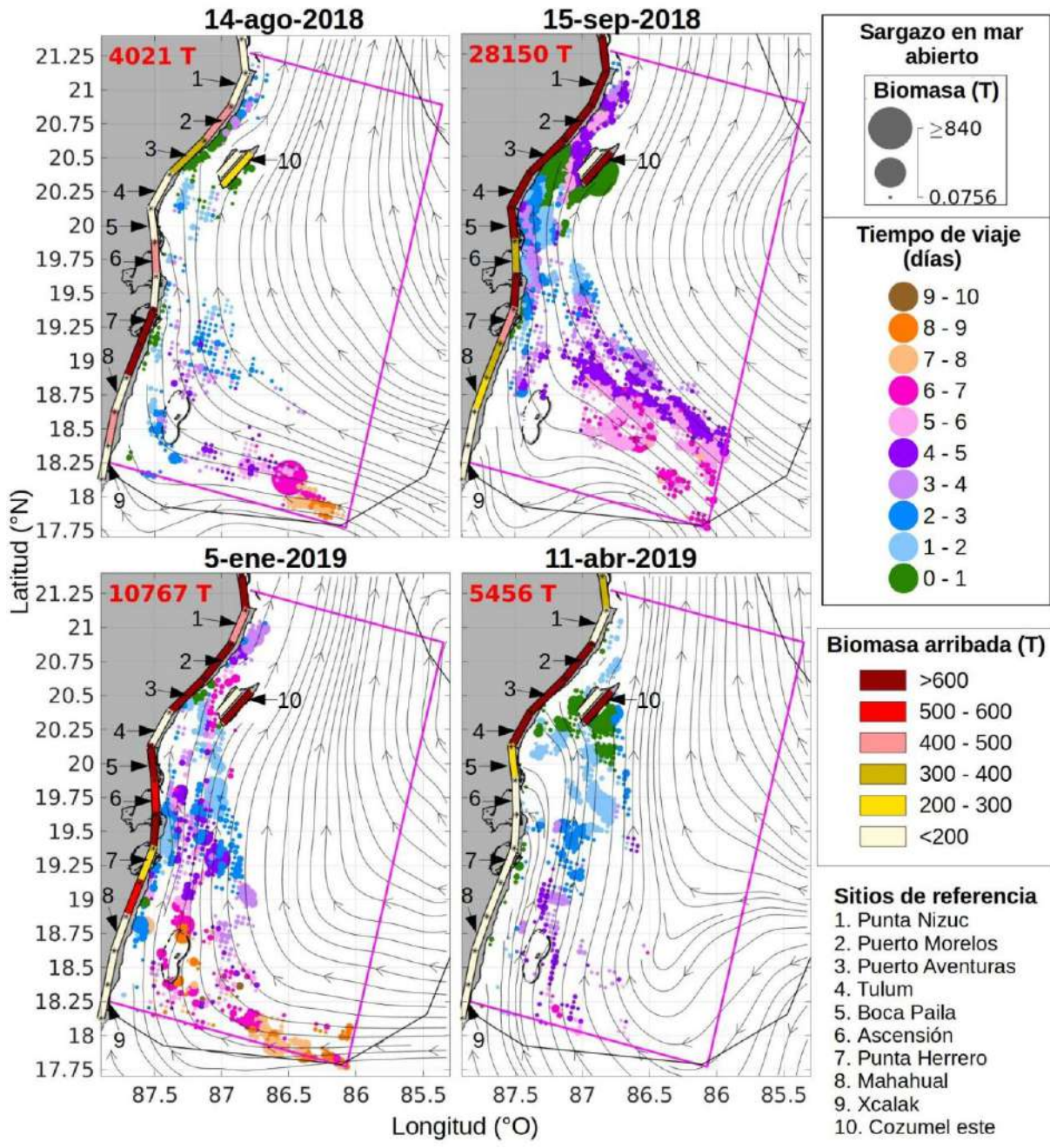


Fig. 29. Destino estimado del sargazo detectado en las fechas específicas, con potencial de arribar al Caribe mexicano. El tamaño de las burbujas representa una estimación inferior de la biomasa del sargazo (en toneladas húmedas) dentro de un área oceánica de ~4.4 km². El color de las burbujas indica el tiempo de viaje necesario para que las partículas virtuales arriben al Caribe mexicano. Los segmentos costeros de colores muestran la estimación inferior de la biomasa

arribada (en toneladas húmedas) a lo largo de secciones de la costa dentro de rangos de latitud de 0.25°. Las líneas con flechas muestran la velocidad de las corrientes superficiales y los vientos (integrando los factores de viento del 1%, 2% y 3%) en el día especificado. La incertidumbre de la biomasa es grande, ya que la estimación superior es ~27 veces la estimación inferior. Los cálculos se obtuvieron con un modelo de seguimiento de partículas virtuales, utilizando corrientes superficiales del HYCOM Global y vientos del análisis ERA5. Los resultados mostrados son el conjunto (promedio) de simulaciones utilizando factores de viento del 1%, 2% y 3%.

7.3.5. Comparación de estimaciones del modelo con observaciones

La distribución modelada de sargazo en el Caribe mexicano tuvo un porcentaje de coincidencia con la distribución de sargazo detectada satelitalmente de entre 44% y 80%, dependiendo del periodo simulado y del factor de viento considerado (Tabla IV). Por ejemplo, las estimaciones correspondientes al 15 de septiembre de 2018 por lo general tuvieron los mayores porcentajes de coincidencia (72%, 77% y 78% con factores de viento de 1%, 2% y 3%, respectivamente), mientras que las del 11 de abril de 2019 tuvieron los menores porcentajes de coincidencia (44%, 48% y 59% con factores de viento de 1%, 2% y 3%, respectivamente). El porcentaje de coincidencia más alto para cada uno de los días analizados y el factor de viento que lo causó fueron variables. Por ejemplo, para el 14 de agosto de 2018, el mayor porcentaje de coincidencia (64%) se obtuvo con un factor de viento del 2%; para el 15 de septiembre de 2018, el mayor porcentaje de coincidencia (78%) se obtuvo con un factor de viento del 3%; y para el 5 de enero de 2019, el mayor porcentaje de coincidencia (80%) se obtuvo con un factor de viento del 1%.

Tabla IV. Porcentajes de coincidencia al comparar la distribución de sargazo modelada con la detectada satelitalmente. Se consideraron tres factores de viento y cuatro fechas de sembrado de partículas virtuales. Las partículas virtuales se advectaron durante siete días, usando corrientes superficiales del HYCOM Global y vientos del reanálisis ERA5.

Factor de viento (%)	2018-ago-14	2018-sep-15	2019-ene-5	2019-abr-11
1	62 %	72 %	80 %	44 %
2	64 %	77 %	68 %	48 %
3	51 %	78 %	69 %	59 %

Los boletines de la Red de Monitoreo de Sargazo de Quintana Roo del 13 al 19 de abril de 2019 (Fig. 28) son consistentes con las estimaciones de transporte de sargazo detectadas el 11 de abril de 2019 (Fig. 29). Se informó de un exceso de sargazo el 13 de abril a lo largo de tres regiones costeras: alrededor de Tulum (~20.25°N), entre 20.5°N (Puerto Aventuras) y 20.6°N (al sur de Puerto Morelos) y entre 20.8°N (Puerto Morelos) y 20.9°N (al sur de Punta Nizuc) (Fig. 28). Como se infiere del modelo, el exceso de sargazo en estas regiones probablemente fue causado por tres grandes balsas de sargazo detectadas a ~20 km de la costa, el 11 de abril, y centradas en (a) 20.1°N, 87.3°O, (b) 20.2°N, 87.2°O y (c) 20.4°N, 87.1°O (sargazo en verde y azul claro; Fig. 29). El 14 de abril, se informó de un exceso de sargazo a lo largo de la mayor parte de la costa norte del Caribe mexicano, desde Tulum (~20.25°N) hasta Punta Nizuc (~21°N) (Fig. 28). Este exceso probablemente fue causado por balsas de sargazo que el 11 de abril estaban a 20-50 km de la costa, entre 19°N y 19.75°N (sargazo en azul oscuro; Fig. 29). El 15 de abril, se informó de menos arribo de sargazo, excepto cerca de Tulum (~20.25°N) (Fig. 28). La región de Tulum probablemente estaba recibiendo balsas de sargazo que el 11 de abril fueron detectadas a 20-50 km de la costa, al sur de ~19.25°N (Punta Herrero) (sargazo en morado; Fig. 29). Se informó de una reducción en el

arribo de sargazo en toda la región el 16 de abril (Fig. 28). Esto es consistente con un área libre de sargazo en el sureste del Caribe mexicano el 11 de abril (Fig. 29). Se informó nuevamente de un exceso de sargazo desde Tulum (~20.25°N) hasta Punta Nizuc (~21°N) el 19 de abril (Fig. 28). Sin embargo, se estima que la mayoría del sargazo que arribó después del 18 de abril no estaba en el Caribe mexicano el 11 de abril (Fig. 29), sino probablemente más hacia el este de la Corriente Caimán, en aguas internacionales.

7.4. Discusión

7.4.1. Estimaciones de transporte y arribo

El sargazo detectado el 15 de septiembre de 2018 se estimó que causó el mayor arribo de biomasa de sargazo, mientras que el sargazo detectado el 14 de agosto de 2018 causó el menor arribo de biomasa de sargazo (Fig. 29). Estas diferencias se explican principalmente por la cantidad de sargazo que se detectó en aguas del Caribe mexicano, más que por la variabilidad temporal de las corrientes y vientos. El norte del Caribe mexicano generalmente recibió una parte considerable del sargazo detectado en los momentos específicos (Fig. 29). Esto es consistente con la indicación de que las latitudes alrededor de la isla de Cozumel, entre Tulum y Puerto Morelos, son particularmente propensas al arribo de sargazo (Fig. 22), lo cual es una consecuencia de las características atmosféricas (vientos alisios), hidrodinámicas (Corriente de Yucatán) y geomorfológicas (orientación de la línea de costa) del Caribe mexicano (Uribe-Martínez et al., 2022). Sin embargo, además de los aspectos físicos, la ubicación del sargazo dentro del Caribe mexicano también determina qué secciones de la costa serán las más afectadas. Por ejemplo, si el sargazo en el Caribe mexicano es escaso, los arribos serán bajos incluso si los vientos y las corrientes favorecen el transporte hacia la costa. Chávez et al. (2020) y Uribe-Martínez et al. (2022)

también reportan una mayor presencia de sargazo entre las latitudes de Tulum y Puerto Morelos (aproximadamente), debido a una serie de interacciones intrincadas entre la ubicación de las balsas de sargazo y las condiciones oceánicas y atmosféricas a distintas escalas (Uribe-Martínez et al., 2022).

Las estimaciones de biomasa tienen un intervalo amplio de incertidumbre asociado con las limitaciones de la detección por satélite (Hu et al., 2015; Cuevas et al., 2018; Wang y Hu, 2021). En el caso de las imágenes Landsat-8, para cada píxel de sargazo, la estimación mínima de biomasa de sargazo es de aproximadamente 0.2 T húmedas: balsas de sargazo de densidad mínima (0.00126 T húmedas/m²; Wang et al., 2018) cubren 180 m², es decir, 20% del área del píxel (Hu et al., 2015). De manera similar, la estimación máxima de biomasa es de aproximadamente 6 T húmedas: balsas de sargazo de máxima densidad (0.00674 T húmedas/m²; Wang et al., 2018) cubren 900 m², es decir, el 100% del área del píxel. Por lo tanto, para cada píxel de sargazo en las imágenes Landsat-8, la biomasa máxima esperada (~6 T húmedas) es ~3000% de la biomasa mínima esperada (~0.2 T húmedas). La diferencia de biomasa de ~3000% es mucho mayor que la que biomasa que podría generar el crecimiento del sargazo a lo largo de su trayectoria en el Caribe Mexicano: incluso si el sargazo sigue trayectorias de 10 días manteniendo una alta tasa de crecimiento de 0.07 duplicaciones/día, como las reportadas para el sargazo en aguas de Puerto Morelos (Magaña-Gallegos et al., 2023a), la biomasa de sargazo sólo aumentaría ~200% (Ec. 6). Esto muestra que, para las escalas espaciales y temporales que se estudiaron, modelar el crecimiento difícilmente mejora las estimaciones de arriba si la incertidumbre en la biomasa inicial del sargazo es tan grande. De acuerdo con esto, Brooks et al. (2018) concluyeron que incorporar el crecimiento es relevante cuando se modelan tiempos de viaje más largos (del orden de meses). De manera similar, los efectos de la inercia en el transporte no se pueden reproducir con precisión si la biomasa inicial de

las masas de sargazo es incierta. Según Brooks et al. (2019), las trayectorias de una semana podrían tener desviaciones de decenas de kilómetros debido a la inercia, aunque no proporcionan información más detallada al respecto. En este estudio, las partículas virtuales generalmente arribaron en menos de cuatro días, por lo que los sesgos en la estimación de arribo debidos a la inercia deberían de estar, por lo general, dentro del error que representan los conos de incertidumbre (Fig. 24).

Las estimaciones del modelo están asociadas con una incertidumbre espacial de al menos el tamaño de celda de los datos de corrientes (~10 km), aunque esta aumenta a medida que se estiman trayectorias más largas (acumulación de errores) (Fig. 24). La imposibilidad de definir *a priori* qué factor de viento es el más realista constituyó una fuente principal de incertidumbre: se observaron incertidumbres del orden de $\pm 0.125^\circ$ (± 15 km) para trayectorias de ~5 días (Fig. 24). Debido a estas incertidumbres y efectos inerciales no contabilizados, las estimaciones de arribo no deben interpretarse a un nivel muy local (para playas o lagunas arrecifales específicas), sino a nivel regional, por ejemplo, cuantificando el arribo a lo largo de secciones costeras dentro de intervalos de 0.25° de latitud (Fig. 22; Fig. 23). De acuerdo con esto, Rodríguez-Martínez et al. (2022) estiman que las predicciones de arribo al Caribe Mexicano que usan datos satelitales deberían tener una incertidumbre en el orden de decenas de kilómetros.

Un sistema de pronóstico y alerta temprana de arribos masivos de sargazo al Caribe mexicano debe proporcionar información como se muestra en la Fig. (29). Aunque dicho sistema debe utilizar vientos y corrientes generados con modelos en modo de pronóstico (*forecast*), se puede aplicar la mayor parte de los métodos aquí presentados. El modelo de seguimiento de partículas virtuales y los métodos de procesamiento fueron diseñados para ser rápidos y eficientes, por lo que las alertas tempranas pueden calcularse en muy poco tiempo y sin necesidad de equipo

informático complejo. Por lo tanto, las predicciones oportunas sobre los tiempos y regiones de arribos masivos podrían proporcionar orientación sobre cuándo y dónde dirigir las medidas de contención y recolección de sargazo. Otros sistemas de pronóstico, incluso más simples, han mostrado que predicciones de arribo de sargazo con algunos días de anticipación son útiles para planificar medidas de manejo y mitigación (Webster y Linton et al., 2013; Maréchal et al., 2017; Xu et al., 2022; Red de Monitoreo del Sargazo de Quintana Roo).

7.4.2. Comparación de estimaciones del modelo con observaciones

En general, la distribución modelada de sargazo en el Caribe mexicano tuvo un porcentaje de coincidencia de ~70%. Los modelos a gran escala han logrado esta precisión sólo después de considerar el crecimiento, la mortalidad y la reproducción del sargazo (Brooks et al., 2018). El presente estudio muestra que se pueden obtener predicciones razonables del transporte de sargazo dentro del Caribe mexicano sin la necesidad de modelar tales rasgos biológicos. Brooks et al. (2018) también concluyen que para simulaciones de menor escala (i.e., menores a dos meses) el transporte físico es el principal determinante de la distribución de sargazo. En contraste, el factor de viento mostró un efecto considerable en el porcentaje de coincidencia, el cual probablemente está relacionado con el espesor en profundidad de las balsas de sargazo. Por ejemplo, si las balsas de sargazo son muy delgadas y superficiales, su transporte podría verse más influenciado por el viento. Por el contrario, si las balsas de sargazo son muy gruesas, su transporte podría verse menos influenciado por el viento, ya que una mayor proporción de la balsa se encuentra sumergida. Dado que las balsas de sargazo tienen espesores variables (Ody et al., 2019), tiene sentido que el transporte de diferentes balsas de sargazo se aproxime mejor al considerar diferentes factores de viento. Putman et al. (2020) también encontraron que un intervalo de factores de viento del 1% al 3% puede mejorar las predicciones de transporte de sargazo.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el proceso de validación aún es necesario, pues la comparación con imágenes satelitales, aunque es útil (Brooks et al., 2018; Kwon et al., 2019), no es concluyente porque no se tiene certeza de que el sargazo detectado en una región y momento iniciales sea el mismo que el detectado en una región y momento finales. Es decir, la detección satelital no informa con precisión la trayectoria y posición final de las balsas de sargazo detectadas en determinado momento. Lo anterior se relaciona con la cobertura de nubes, la insuficiente resolución espacial y temporal de las imágenes, y con el hecho de que las balsas de sargazo se agregan y desagregan, volviéndose detectables o indetectables durante determinados periodos (Hu et al., 2015; Cuevas et al., 2018; Uribe-Martínez et al., 2022).

La comparación cualitativa entre los boletines del 13 al 19 de abril de 2019 (Fig. 28) y las estimaciones de transporte y arribo para el sargazo detectado el 11 de abril de 2019 (Fig. 29) muestra similitud entre ambos, de forma tal que parte de la información observada en los boletines se puede explicar con los resultados del modelo. Asimismo, constituye un ejemplo de cómo se pueden interpretar los resultados del modelo para obtener información de las trayectorias, sitios de arribo y tiempos de arribo que sea útil para cuestiones de prevención y mitigación de arribos masivos. Los boletines no constituyen un producto científico pues se construyen de manera un tanto subjetiva y no se ha cuantificado la incertidumbre o grado de confianza asociado a ellos; sin embargo, los boletines en el contexto de este trabajo muestran la importancia y utilidad de contar con información de su tipo. Sería altamente benéfico contar con un sistema de información científica, libremente disponible, que indique las cantidades de sargazo que arriban diariamente a distintas secciones a lo largo de toda la costa del Caribe mexicano.

Para realizar una evaluación robusta de las predicciones del modelo se requieren observaciones no sólo de imágenes satelitales y de las cantidades de sargazo que arriban, sino

también datos de otras formas de monitoreo de sargazo, por ejemplo, siguiendo sus trayectorias mediante drones, aviones, o GPS (Putman et al., 2020; Trinanés et al., 2021a, 2021b), las cuales permitan conocer el escenario real del sitio inicial de balsas de sargazo, su trayectoria recorrida, y el sitio final al que llegaron tras determinado tiempo. Conseguir toda esta información es un reto que demanda colaboraciones, diversas capacidades técnicas, tiempo y financiamiento, pero sin duda contribuirá para que los modelos se calibren, validen y diseñen de mejor manera.

7.4.3. Aspectos para mejorar

Las estimaciones del destino del sargazo tienen limitaciones relacionadas tanto con los insumos que requiere el algoritmo Lagrangiano como con el algoritmo Lagrangiano mismo. En cuanto a la detección satelital de sargazo, esta con frecuencia es obstruida por la cobertura de nubes, y tiene restricciones por resolución espacial (e.g., los píxeles de Landsat-8 son de 30x30 m), temporal (e.g., Landsat-8 detecta la misma región cada 16 días) y espectral (e.g., no captura la totalidad de la firma espectral del sargazo). Así, es un gran reto determinar inequívocamente la presencia, cantidad y distribución horizontal y vertical de las balsas de sargazo en cada píxel de las imágenes satelitales. Contar con detección satelital de mayor resolución permitiría disminuir la incertidumbre sobre la presencia y cantidad de sargazo, aunque implicaría manejar un mayor número de datos (mayor costo computacional). Por otro lado, al no conocerse el espesor de las balsas de sargazo (e.g., la detección satelital no lo indica), no se puede decidir *a priori* qué factor de viento es el más adecuado; por ejemplo, el transporte de balsas delgadas podría modelarse mejor con un factor de viento de 3%, mientras que el de balsas gruesas podría modelarse mejor con un factor de viento de 1%. Al no conocer la biomasa inicial del sargazo, es difícil reproducir efectos inerciales realistas, pues estos dependen de la masa del objeto en cuestión (i.e., sargazo). Asimismo, es dudoso el sentido de modelar crecimiento en el Caribe mexicano debido a que este es mínimo con respecto a

la incertidumbre en la biomasa inicial del sargazo; es decir, primero es necesario conocer con mayor certeza cuánto sargazo hay en el Caribe mexicano para que la inclusión de modelos de crecimiento permita mejorar las estimaciones de biomasa arribada.

Una de las principales limitaciones de los datos proporcionados por modelos globales de circulación oceánica (e.g., los experimentos de HYCOM), es que no representan procesos que ocurren a escalas espaciales menores al tamaño de las celdas de malla. Por ejemplo, una definición relativamente pobre de la línea de costa del Caribe mexicano, especialmente en el canal de Yucatán, evita que se pueda representar detalladamente a la circulación costera, incluida la del interior de lagunas arrecifales (las lagunas son mucho menores que las celdas de malla y su dinámica está determinada por procesos distintos a los que determinan la circulación en mar abierto). En consecuencia, las estimaciones de transporte y arribo de sargazo están asociadas a un margen de error de por lo menos el tamaño de las celdas de maya: ~10 km considerando el HYCOM Global. Los modelos de mallas no estructuradas (e.g., FVCOM; Chen et al. 2003) son una opción para aumentar la resolución en zonas costeras, definiendo mejor la línea de costa, sin necesidad de aumentar la resolución en el mar abierto lejano de la costa. Sin embargo, reproducir a detalle (en la escala de metros) la morfología costera a lo largo del Caribe mexicano, incluidas sus lagunas arrecifales, requiere de otro tipo de proyecto y de capacidades. Esa labor requeriría una batimetría muy detallada de la región (inexistente a la fecha para varias localidades de la región), y un gran poder de cómputo, capaz de correr simulaciones de tan alta resolución en un dominio extenso y por varios días. Sin embargo, ese tipo de modelación no constituirá un sistema sencillo, económico y rápido en términos computacionales que pudiera ser utilizado de forma pronta y amigable para el manejo del problema. Contar con modelos oceánicos y atmosféricos que provean de manera más

realista la circulación del Caribe mexicano en sus distintas escalas representa un gran reto, pero permitirá sin duda generar estimaciones más precisas de transporte y arribo de sargazo.

Otro aspecto de mejora es que aún falta conocimiento sobre los procesos fisiológicos del sargazo y su relación con variables ambientales, el cual es necesario para modelar con precisión el crecimiento, mortalidad y reproducción de la macroalga. Para el Caribe mexicano, únicamente se han medido tasas de crecimiento de sargazo en aguas de la laguna arrecifal de Puerto Morelos (cultivos *ex situ* en su mayoría, con algunos *in situ*), pero no se han correlacionado con variables que permitan construir modelos predictivos (Magaña-Gallegos et al., 2023a). Resultaría útil que en distintas zonas del Caribe mexicano (e.g., en diversas lagunas arrecifales a lo largo de la costa, y en aguas oceánicas a diferentes distancias de la costa) se midieran tasas de crecimiento, mortalidad (e.g., tasas de hundimiento por crecimiento de epífitas calcáreas, herbivoría, o senescencia) y reproducción (e.g., frecuencia de fragmentación de los talos) junto con concentración de nutrientes, temperatura, clorofila, reservas internas de nutrientes y otras variables que pudieran tener una relación estrecha con el crecimiento. El estudio de Lapointe et al. (2014) es el único que documenta tasas de crecimiento de sargazo medidas en distintas regiones, tanto neríticas como de mar abierto, las cuales pudimos explicar relativamente bien por la concentración de clorofila (indicador del estado trófico del agua). Se sugieren más estudios que corroboren estos hallazgos, poniendo particular énfasis en el Caribe mexicano. Una forma eficiente para mejorar las estimaciones del modelo sería dar prioridad en reducir la incertidumbre asociada a los factores que tuvieron una mayor influencia en las estimaciones de arribo: 1) modelar de forma más realista el efecto de arrastre de sargazo debido al viento, 2) contar con detección de sargazo de mayor resolución espacial y temporal, sin que pierda precisión, 3) contar con modelos oceánicos y atmosféricos de mayor resolución espacial que logren resolver las dinámicas a nivel de laguna arrecifal (además de

las dinámicas de mayor escala), y que representen con un error cada vez menor a la variabilidad espacial y temporal de las corrientes y vientos, 4) contar con detección remota de sargazo que permita estimar su biomasa sin tanta incertidumbre, así como con información fisiológica del sargazo que permita construir modelos biológicos realistas.

En los modelos Lagrangianos se asume que el sargazo puede ser representado como partículas virtuales sin interacción entre sí, despreciando que la macroalga tiene masa y una forma tridimensional compleja (con ramificaciones), lo cual puede conducir al entrelazamiento de varios talos de sargazo e influir sobre el proceso de transporte (Beron-Vera, 2021; Beron-Vera y Miron, 2020). Tomar en cuenta esos aspectos también podría ayudar a que los modelos de transporte y arribo de sargazo tengan más precisión; sin embargo, los modelos más complejos se vuelven computacionalmente costosos, más difíciles de parametrizar, calibrar, e interpretar. Todo modelo, al ser una representación abstracta y simplificada de la realidad, se asocia a un margen de error en función del cual se deben de interpretar sus resultados. Los resultados del modelo Lagrangiano aquí utilizado tienen una incertidumbre en el orden de la decena de kilómetros, debido a la resolución de los campos de corrientes y vientos y a efectos inerciales no considerados (Brooks et al., 2019). Rodríguez-Martínez et al. (2022) también consideran que predicciones de arribo de sargazo al Caribe mexicano a partir de detección satelital (MODIS) tendrían un margen de error con dicho orden de magnitud. Por lo anterior, las estimaciones de biomasa arribada no se presentan para sitios muy localizados, sino para secciones de la costa dentro de $1/4^\circ$ de latitud (~30 km). Considerando esta resolución espacial, se puede tener una mayor confianza en las estimaciones de arribo de sargazo, permitiéndonos saber qué regiones (no localidades) del Caribe mexicano serán más o menos afectadas por el arribo de sargazo.

7.5. Conclusión

Los resultados muestran que una gran cantidad de sargazo arribó al Caribe mexicano durante el período de estudio, con un total estimado de al menos 48,394 T en los cuatro eventos monitoreados. Los arribos de sargazo ocurrieron en diferentes secciones a lo largo de la costa, siendo usualmente muy afectada la región alrededor de la isla de Cozumel. El tiempo requerido para que el sargazo flotante arribara en la región varió dependiendo de la ubicación de detección y del factor de viento, con tiempos de viaje de <1 a 9 días. La distribución modelada de sargazo en aguas del Caribe mexicano tuvo un porcentaje de coincidencia variable dependiendo del periodo simulado y del factor de viento considerado, mientras que los informes de la Red de Monitoreo de Sargazo de Quintana Roo del 13 al 19 de abril de 2019 fueron consistentes con las estimaciones de arribo del sargazo detectado el 11 de abril de 2019. El estudio destaca los alcances y limitaciones que podría tener un sistema de estimación, pronóstico y alerta temprana de arribos masivos de sargazo al Caribe mexicano, el cual use datos de corrientes y vientos de modelos globales de libre acceso. Tal sistema podría tener la capacidad de proporcionar información oportuna y suficientemente precisa (a escala regional, mas no local) sobre los tiempos y regiones de arribo del sargazo detectado en aguas del Caribe mexicano. Dicha información puede ser aprovechada para dirigir de manera más efectiva las medidas de contención y recolección del sargazo.

8° capítulo – Conclusiones generales

Los serios problemas que enfrenta el Caribe mexicano desde el año 2014, debidos al crecimiento atípicamente masivo de sargazo en la Región de Recirculación NorEcuatorial, demandan conocimiento y acciones para prevenir y mitigar el arribo excesivo de la macroalga, así como los diversos efectos nocivos que se derivan del mismo. Parte de lo necesario para lograr lo anterior es: (i) contar con modelos numéricos diseñados para simular el transporte de sargazo en el Caribe mexicano, capaces de estimar dónde, cuándo y cuánto sargazo arribará (Capítulo 4), (ii) conocer qué factores son indispensables de considerar en dichos modelos y sus prioridades, así como su margen de error (Capítulo 5), (iii) caracterizar las rutas de dispersión que usualmente sigue el sargazo para arribar al Caribe mexicano bajo distintas condiciones oceánicas y atmosféricas (Capítulo 6), y (iv) predecir las rutas de viaje y regiones de arribo del sargazo detectado en determinados momentos dentro del Caribe mexicano (Capítulo 7). Los principales hallazgos derivados de cada uno de los capítulos de investigación se enlistan a continuación.

Capítulo 4: Sistema Lagrangiano y fuentes de datos:

- Se recomienda usar un paso de tiempo pequeño (60 s) para evitar que las partículas virtuales encallen de manera no realista, particularmente en la zona del canal de Cozumel, así como para generar resultados del modelo que coincidan con el tiempo de realización de mediciones (e.g., momentos de detección satelital, de toma de fotografías y videos, y de toma de datos con boyas de deriva).
- Cuando la interpolación bilineal de las velocidades de corrientes y vientos a la posición y tiempo de las partículas virtuales falla cerca de la línea de costa (la partícula virtual no está rodeada por cuatro puntos de malla con datos de velocidad), se recomienda utilizar la

interpolación del vecino más cercano. Esto también es conveniente para evitar que las partículas virtuales encallen de manera no realista, particularmente en la zona del canal de Cozumel.

- El método de integración Runge-Kutta de 2^{do} orden resultó óptimo para el paso de tiempo de 60 s y las escalas espacio-temporales estudiadas (tiempos de deriva de hasta 10 días), ya que genera resultados tan precisos como los del método Runge-Kutta de 4^{to} orden, pero en un tiempo considerablemente menor (es más eficiente computacionalmente).
- El sistema Lagrangiano usa datos de reanálisis globales de corrientes y vientos que se pueden descargar de manera gratuita a través de Internet. Lo anterior es una opción para no tener que correr modelos oceánicos y atmosféricos locales, lo cual es computacionalmente más rápido y no necesariamente conlleva a resultados menos realistas. No obstante, la resolución de los reanálisis globales es insuficiente para reproducir a detalle las dinámicas costeras como las que ocurren dentro de lagunas arrecifales; por lo tanto, los resultados derivados a partir de dichos reanálisis se tienen que interpretar con un margen de error de por lo menos el tamaño de la celda de malla (~10 km). En este estudio, se considera que las corrientes del HYCOM Global y los vientos de ERA5 son más realistas que el HYCOM del Golfo de México y los vientos de CFSv2, ya que resultaron más similares a datos medidos.
- Se diseñó un sistema Lagrangiano lo más sencillo posible para abordar el problema de interés (transporte de sargazo en el Caribe mexicano), lo cual resultó en un código de rápida ejecución computacional, fácil de entender, implementar, modificar e interpretar. Un sistema con estas características es deseable porque se puede ejecutar en equipos de cómputo promedio (e.g., laptops) y aun así generar resultados lo suficientemente rápido como para emitir pronósticos y alertas tempranas.

Capítulo 5: Análisis de sensibilidad: cambio en el porcentaje de arribo debido a cambios en parámetros del modelo:

- De los siete parámetros analizados (factor de viento, distribución espacial inicial del sargazo, temporalidad de corrientes y vientos, crecimiento de sargazo, espesor de la capa de corrientes, fuente de datos de viento, fuente de datos de corrientes), el factor de viento resultó ser el más influyente en la estimación del porcentaje de arribo (al aumentar el factor de viento aumenta el porcentaje de arribo). Por ello es esencial su inclusión en modelos de seguimiento de sargazo. Sin embargo, es difícil determinar *a priori* el valor más realista para el factor de viento (e.g., 1%, 2% o 3%), pues este es afectado por la profundidad de las balsas de sargazo, la cual aún no se puede determinar mediante detección satelital. Por ejemplo, se esperaría que el transporte de balsas someras (profundas) se modele mejor con factores de viento mayores (menores).
- La distribución espacial del sargazo en superficie fue el segundo factor que más afectó el porcentaje de arribo, ya que hay regiones marinas que no son fuente de sargazo para las costas del Caribe mexicano y otras que sí lo son en gran medida. Sí el sargazo se encuentra mayormente en estas últimas regiones, entonces habrá más arribos al Caribe mexicano. En este sentido, es muy importante contar con una detección satelital de sargazo lo más precisa posible, ya que falsos positivos (o negativos) podrían provocar sobreestimaciones (o subestimaciones) de arribos.
- La variabilidad temporal de las corrientes y vientos fue el tercer factor con más influencia sobre el porcentaje de arribo. Los vientos del este que soplan durante todo el año favorecen el arribo de sargazo en las costas este del Caribe mexicano, mientras que los vientos del norte (característicos de invierno) inhiben el arribo en dichas zonas. Por otro lado, la

Corriente Caimán puede chocar con la Península de Yucatán a distintas latitudes (e.g., al norte o al sur de Banco Chinchorro), lo cual repercute sobre las dinámicas de transporte de sargazo. No obstante, la variabilidad en las corrientes y vientos durante los meses estudiados fue relativamente poca (e.g., los vientos alisios y la Corriente de Yucatán son dominantes y presentes durante todo el año), por lo que este no fue el factor que más influenció el porcentaje de arribo.

- El efecto de los demás factores estudiados fue menor y de magnitud similar. Al considerar crecimiento el porcentaje de arribo aumentó en ~3%; sin embargo, dicho aumento es muy pequeño con respecto a la incertidumbre en la biomasa de sargazo que se detecta satelitalmente. Por ejemplo, cada píxel de sargazo en las imágenes de Landsat-8 puede tener entre 0.2 y 6 T húmedas de sargazo, es decir, la estimación máxima es 3000% la estimación mínima. Por lo tanto, modelar crecimiento para predecir la evolución de la biomasa de sargazo, y tener una mejor idea de la biomasa que arribará, tendrá sentido cuando se conozca con precisión la cantidad de biomasa del sargazo en el mar que se vaya a modelar.
- Respecto a la profundidad de la capa de corrientes, la advección por las corrientes superficiales causó ~3% más arribo que la advección por el promedio de las corrientes en los primeros 5 m. Esto se asocia con el hecho de que las corrientes superficiales son más rápidas y están más influenciadas por el viento. Dado que el efecto de la profundidad de la capa de corrientes fue relativamente pequeño y que el sargazo está mayormente en el primer medio metro de la superficie marina, considerar advección sólo por corrientes superficiales es un enfoque recomendable para mantener al sistema sencillo y la más rápido posible.
- Las fuentes de datos de viento y corrientes tuvieron el menor efecto sobre el porcentaje de arribo. Los vientos de CFSv2 sobreestimaron la velocidad del viento, principalmente en la región costera, por lo que causaron un 2% más de arribo que los vientos de ERA5. El

porcentaje de arribo causado por las corrientes del HYCOM Global difirieron en $\pm 1\%$ con respecto al arribo causado por las corrientes del HYCOM del Golfo de México. Contar con campos de velocidad de vientos y corrientes lo más realista posibles es una parte importante para generar estimaciones de transporte de sargazo realistas.

Capítulo 6: Análisis mensual de la dinámica de sargazo en el Caribe mexicano:

- Los menores porcentajes de arribo de sargazo al Caribe mexicano ocurrieron en invierno, lo cual es consistente con la estacionalidad de los vientos, ya que en invierno ocurren vientos del norte que inhiben el arribo de sargazo en la mayor parte del Caribe mexicano, aunque podrían favorecer arribos en el oeste de la isla de Cozumel.
- La costa del Caribe mexicano entre las latitudes 20.25°N y 20.75°N (desde Tulum hasta Puerto Morelos, incluido el flanco este de la isla de Cozumel) resultó más propensa a los arribos de sargazo debido a la orientación de la línea de costa (ofrece una mayor oposición al flujo de la Corriente de Yucatán que va al norte) y a la presencia misma de la isla (proporciona más litoral donde el sargazo puede arribar). Por otro lado, el potencial de arribo disminuyó desde el norte de Puerto Morelos hasta el extremo norte del Caribe mexicano, lo cual se explica por la orientación de la línea de costa (ofrece una menor oposición al flujo de la Corriente de Yucatán que va al norte), por la intensificación de la Corriente de Yucatán (transporta sargazo al interior del Golfo de México) y por la presencia de la isla de Cozumel (recibe sargazo que de otra forma arribaría en el noreste de la península de Yucatán).
- El sargazo en aguas más cercanas a la línea de costa y más al sur del Caribe mexicano mostró más probabilidad de arribar en la región. El tiempo de arribo fue de ~ 5 días en promedio, aunque este fue generalmente menor (mayor) cuando el sargazo se encontró más

cerca (lejos) de la línea de costa. Por otro lado, el sargazo en aguas del norte del Caribe mexicano y más alejadas de la línea de costa mostró más probabilidad de fluir al interior del Golfo de México. La extensión y forma de la región marina que actuó como fuente de sargazo para las playas del Caribe mexicano se mostró afectada por la posición de la Corriente Caimán, la cual tiene una variabilidad meridional, de modo que a veces puede fluir más al norte o sur de Banco Chinchorro.

- En general, el sargazo que se observó en aguas más al sur del Caribe mexicano y más cercanas a la costa, arribó en la parte sur del Caribe mexicano. Por otro lado, el sargazo en aguas del norte (pero cercanas a la costa) o del sur (pero alejadas de la costa) del Caribe mexicano arribó en la parte norte del Caribe mexicano.
- La estimación de las trayectorias de sargazo se asocia a una incertidumbre fundamentalmente causada por el factor de viento: no se sabe *a priori* qué factor de viento es el más realista para modelar el transporte de sargazo detectado en determinado momento y espacio. Por lo tanto, se sugiere presentar conos de incertidumbre de trayectorias, en donde los bordes de los conos corresponden a las trayectorias considerando factores de viento de 1% y 3%.
- El sargazo que arriba al Caribe mexicano viene del sureste, fluyendo con la Corriente Caimán y posteriormente con la Corriente de Yucatán, mientras es empujado hacia la costa por vientos del este, y tiene una alta probabilidad de pasar por el este y/o sur de Banco Chinchorro (path 17, row 48 de Landsat 8) alrededor de 5 días antes de arribar.
- La estimación de la región desde la que el sargazo arribado al Caribe mexicano se separó de la Corriente de Yucatán, debido a los vientos del este, depende del factor de viento considerado. Dicha región fue relativamente angosta y cercana a la costa cuando el factor

de viento fue pequeño (e.g., 1%), pero se intensificó y ensanchó hacia mar abierto conforme aumentó el factor de viento (e.g., 3%).

Capítulo 7: Estimación del destino del sargazo detectado en momentos específicos:

- Se estima que el sargazo detectado satelitalmente (Landsat-8) en el Caribe mexicano, los días 14-ago-2018, 15-sep-2018, 5-ene-2019 y 11-abr-2019, causó un arribo en la región de por lo menos 48,394 T húmedas de sargazo. El sargazo detectado el 15 de septiembre de 2018 produjo el mayor arribo en la región (al menos 28,150 T húmedas), mientras que el sargazo detectado el 14 de agosto de 2018 produjo el menor arribo (al menos 4021 T húmedas).
- Los mapas aquí generados (Fig. 29) destacan al sargazo en mar abierto que arribará al Caribe mexicano, el tiempo de viaje que requerirá, la trayectoria aproximada que seguirá, e indican qué secciones de la costa recibirán más o menos cantidad de sargazo. Se recomienda que los sistemas de pronóstico y alerta temprana de arribos de sargazo presenten información como la mencionada.
- Al comparar la distribución simulada de sargazo contra la detectada satelitalmente, fue variable el factor de viento que produjo el mayor porcentaje de coincidencia. Esto tiene sentido pues las balsas de sargazo pueden tener un espesor variable y por lo tanto su transporte se modelará mejor considerando distintos factores de viento. Si bien los porcentajes de coincidencia fueron elevados (entre 44% y 80%), este método de validación no es del todo concluyente porque no se tiene la certeza de que el sargazo detectado satelitalmente en una región y tiempo iniciales sea el mismo que el detectado en una región y tiempo finales. Se sugiere hacer validaciones más robustas integrando otras fuentes de datos (además de la detección satelital), tales como seguimientos de sargazo con GPS,

drones y aviones, así como información de la cantidad de sargazo arribado en distintas regiones del Caribe mexicano.

- En cuanto a la comparación cualitativa de abundancia relativa de sargazo a lo largo de la línea de costa del Caribe mexicano, las estimaciones de arribo del sargazo detectado el 11 de abril de 2019 muestran consistencia con los informes de la Red de Monitoreo de Sargazo de Quintana Roo del 13 al 19 de abril de 2019.
- Se espera que un sistema Lagrangiano como el aquí desarrollado tenga la capacidad de proporcionar información oportuna y suficientemente precisa (a escala regional pero no local) sobre los tiempos y regiones de arribo del sargazo detectado en aguas del Caribe mexicano. Dicha información puede ser aprovechada para dirigir de manera más efectiva las medidas de contención y recolección del sargazo.

Apéndice a

Modelo de crecimiento exponencial

En este apéndice se usa un ejemplo de mediciones hipotéticas de masa de sargazo (Tabla AaI) para aplicar y verificar el modelo de crecimiento exponencial expresado de dos formas equivalentes (Ecs. A1 y A2). Además, se presenta la derivación de las ecuaciones que permiten obtener el valor de las tasas de crecimiento exponencial a partir de los datos observados (e.g., Tabla AaI). También se derivan ecuaciones para calcular el “tiempo de duplicación” a partir de las “duplicaciones por día”, y viceversa.

Tabla AaI. Masa (m) de un fragmento de sargazo medida en un tiempo inicial ($t=0$) y cinco días después ($t=5$):

t (días)	m
0	1.00
5	1.42

Con las observaciones de la Tabla (AaI) se procede a ajustar un modelo de crecimiento exponencial, el cual se representa de forma equivalente con las siguientes ecuaciones:

$$m(t) = m(t = 0) * e^{L*t} \quad \text{Ec. (A1)}$$

$$m(t) = m(t = 0) * (1 + dpd)^t \quad \text{Ec. (A2)}$$

Donde:

t = tiempo

m = masa

L = tasa de crecimiento

dpd = tasa de crecimiento expresada como duplicaciones por día

Despejamos L de la Ec. (A1):

$$m(t) = m(t = 0) * e^{L*t}$$

$$e^{L*t} = \frac{m(t)}{m(t=0)}$$

$$L = \frac{\ln\left(\frac{m(t)}{m(t=0)}\right)}{t} \quad \text{Ec. (A3)}$$

Changeux et al. (2023) utilizan la Ec. (A3) para calcular las tasas de crecimiento del sargazo.

Sustituimos en la Ec. (A3) a los valores observados para encontrar el valor de L :

$$L = \frac{\ln\left(\frac{1.42}{1}\right)}{5}$$

$$L = 0.07$$

Despejamos d_{pd} de Ec. (A2):

$$m(t) = m(t = 0) * (1 + d_{pd})^t$$

$$\frac{m(t)}{m(t=0)} = (1 + d_{pd})^t$$

$$d_{pd} = \left(\frac{m(t)}{m(t=0)}\right)^{1/t} - 1 \quad \text{Ec. (A4)}$$

Sustituimos los valores observados para encontrar el valor de d_{pd} :

$$d_{pd} = \left(\frac{1.42}{1}\right)^{1/5} - 1$$

$$d_{pd} = 0.0726 \text{ duplicaciones/día}$$

Las *dpd* también se pueden calcular a partir de observaciones de masa tras intervalos de un día, usando los siguientes razonamientos. 1 duplicación al día se da cuando la diferencia de masa (masa al día siguiente – masa inicial) es igual a la masa inicial, por ejemplo, cuando la masa inicial es de 1 y al día siguiente es de 2. Después se procede con regla de tres: si la masa inicial corresponde a una duplicación, ¿cuántas duplicaciones representa la diferencia de masa? El razonamiento anterior se traduce en la siguiente ecuación:

$$dpd = \frac{m(t)-m(t-1)}{m(t)} \quad \text{Ec. (A5)}$$

En la Tabla (AaII) se verifica que las Ecs. (A1 y A2) son equivalentes, al sustituir los valores encontrados de $L=0.07$ y $dpd=0.073$. También se usa la Ec. (A5) para verificar el valor de *dpd* calculado con la Ec. (A4).

Tabla AaII. Aplicación y verificación numérica de las Ecs. (A1, A2, A4 y A5), usando los valores encontrados de $L=0.07$ y $dpd=0.073$, los cuales se derivaron a partir de los datos de la Tabla I.

<i>t</i> (días)	Ec. (A1) $m(t) =$ $m(t = 0) * e^{L*t}$	Ec. (A2) $m(t) =$ $m(t = 0) * (1 + dpd)^t$	Ec. (A4) $dpd(t) =$ $\left(\frac{m(t)}{m(t = 0)}\right)^{\frac{1}{t}} - 1$	Ec. (A5) $dpd(t) =$ $\frac{m(t) - m(t - 1)}{m(t)}$
0.0	1.00	1.00		
0.5	1.04	1.04	0.073	
1.0	1.07	1.07	0.073	0.073
1.5	1.11	1.11	0.073	
2.0	1.15	1.15	0.073	0.073
2.5	1.19	1.19	0.073	
3.0	1.23	1.23	0.073	0.073
3.5	1.28	1.28	0.073	
4.0	1.32	1.32	0.073	0.073
4.5	1.37	1.37	0.073	
5.0	1.42	1.42	0.073	0.073
5.5	1.47	1.47	0.073	
6.0	1.52	1.52	0.073	0.073
6.5	1.57	1.57	0.073	

7.0	1.63	1.63	0.073	0.073
7.5	1.68	1.68	0.073	
8.0	1.74	1.74	0.073	0.073
8.5	1.81	1.81	0.073	
9.0	1.87	1.87	0.073	0.073
9.5	1.94	1.94	0.073	
10.0	2.00	2.00	0.073	0.073

Por lo tanto, el modelo exponencial ajustado a los datos observados (Tabla AaI) se puede expresar de las siguientes dos formas equivalentes:

$$m(t) = e^{0.07*t}$$

$$m(t) = (1 + 0.0726)^t$$

Es posible calcular el tiempo de duplicación (td) de la masa a partir de las dpd , partiendo de la Ec. (A2):

$$m(t = td) = m(t = 0) * (1 + dpd)^{t=td}$$

Se considera que la masa al tiempo de duplicación debe de ser dos veces la masa al tiempo inicial:

$$2 * m(t = 0) = m(t = 0) * (1 + dpd)^{td}$$

Se despeja td :

$$2 = (1 + dpd)^{td}$$

$$\ln(2) = td * \ln(1 + dpd)$$

$$td = \frac{\ln(2)}{\ln(1+dpd)} \quad \text{Ec. (A6)}$$

Calculamos el tiempo de duplicación usando la Ec. (A6) y el dpd calculado con la Ec. (A4):

$$td = \frac{\ln(2)}{\ln(1+0.0726)}$$

$$td = 10 \text{ días}$$

En la Tabla (AaII) se verifica que la masa al tiempo inicial, $m(t=0)=1$, efectivamente se duplica después de 10 días, $m(t=10)=2$.

El tiempo de duplicación (td) también se puede calcular como función de L y/o de los datos observados, partiendo de la Ec. (A1):

$$2 * m(t = 0) = m(t = 0) * e^{L*td}$$

$$2 = e^{L*td}$$

$$L * td = \ln(2)$$

$$td = \frac{\ln(2)}{L} \tag{Ec. (A7)}$$

La Ec. (A7) se utiliza en la Tabla II (Sección 3.2.2) para obtener el tiempo de duplicación a partir de las tasas de crecimiento reportadas en Changeux et al. (2023).

Se sustituye L por la Ec. (A3), y se simplifica:

$$td = \frac{\ln(2)}{\frac{\ln\left(\frac{m(t)}{m(t=0)}\right)}{t}}$$

$$td = t \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{m(t)}{m(t=0)}\right)} \tag{Ec. (A8a)}$$

También se puede hacer cambio de base en la Ec. (A8a) para calcular el tiempo de duplicación usando logaritmo base 2:

$$td = \frac{t}{\log_2\left(\frac{m(t)}{m(t=0)}\right)} \quad \text{Ec. (A8b)}$$

Se sustituyen los datos observados (Tabla AaI) en la Ec. (A8a):

$$td = 5 \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{1.42}{1}\right)}$$

$$td = 5 \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{1.42}{1}\right)}$$

$$td = 10 \text{ días}$$

Las d_{pd} también se pueden calcular como función del td , despejándolas de la Ec. (A6). En la Ec. (A6) se hace el cambio de logaritmo base e a logaritmo base 2:

$$td = \frac{1}{\log_2(1+d_{pd})}$$

Se despeja d_{pd} :

$$\log_2(1 + d_{pd}) = \frac{1}{td}$$

$$d_{pd} = 2^{\frac{1}{td}} - 1 \quad \text{Ec. (A9)}$$

En los estudios de Lapointe (1986), Hanisak y Samuel (1987), Lapointe et al. (2014), Magaña-Gallegos et al. (2023a, 2023b) y Corbin y Oxenford et al. (2023) se aplica la Ec. (A8b) para estimar el tiempo de duplicación del sargazo, lo cual se refleja en la Tabla II (Sección 3.2.2). Desconocemos por qué los citados estudios utilizan el inverso multiplicativo de la Ec. (A8b) para

calcular las tasas de crecimiento como d_{pd} , pues tasas calculadas así conllevan a sobreestimaciones de sus propias observaciones. Por ejemplo, en esos estudios se asume que un tiempo de duplicación de 10 días corresponde a 0.1 duplicaciones/día, cuando en realidad dicho tiempo de duplicación corresponde a ~ 0.07 duplicaciones/día (Ec. A9). Considerando ~ 0.07 duplicaciones/día, una masa inicial de 1 tendrá una masa final de 2 al término de 10 días, mientras que considerando 0.1 duplicaciones/día dicha masa inicial tendrá una masa final de ~ 2.6 tras ese mismo lapso (Ec. A2). Es decir, la masa final se sobreestimó en un 30%. En este proyecto doctoral se decidió usar las duplicaciones por día tal cual están reportadas en Lapointe et al. (2014) porque siguen generando crecimientos que caen dentro del intervalo de tiempos de duplicación reportados en otras fuentes (Tabla II). Lo anterior da solidez a la conclusión de que el crecimiento no es el principal factor que impacta las estimaciones de arriba en nuestro modelo, pues el efecto del crecimiento hubiera sido aún menor si se hubieran considerado las duplicaciones por día que realmente corresponden a los tiempos de duplicación observados en Lapointe et al. (2014). No hay que olvidar que sólo se modeló una primera aproximación de cuánto podría crecer el sargazo en función del estado trófico del agua de mar, y que hay una gran incertidumbre en cuanto a las tasas de crecimiento de sargazo y los factores que las determinan.

Apéndice b

Exploración de la temperatura como predictor de crecimiento de sargazo en el Caribe mexicano

Para evaluar la posibilidad de construir un modelo de crecimiento de sargazo en función de la temperatura en el Caribe mexicano, se realizó un análisis sencillo de los datos de temperatura y tasas de crecimiento medidos por Magaña-Gallegos et al. (2023b) (Tabla AbI).

Tabla AbI. Parte de los datos proporcionados de Magaña-Gallegos et al. (2023b). “Prueba” es serie de pruebas al mismo tiempo, “TQ” es tanque/replica, y SGR_DAY_% es Specific Growth Rate (Doublings per day) después de 5 días.

Prueba	TQ	Especie	Tratamiento	SGR_DAY_5
2	4	<i>S. natans VIII</i>	22	0.07
2	6	<i>S. fluitans III</i>	25	0.10
2	11	<i>S. natans VIII</i>	28	0.04
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	16	<i>S. natans I</i>	31	0.04

Se construyó un gráfico de caja y bigotes (Fig. Ab1) en donde se muestran los tiempos de duplicación (calculados como $1/\text{SGR_DAY_5}$) de los tres morfotipos de sargazo, estando a 4 temperaturas en cultivos *ex situ* en aguas de Puerto Morelos. Cada caja está construida con 10 a 13 observaciones. Se destaca el traslape entre las distintas cajas y bigotes, y que a una misma temperatura los distintos morfotipos pueden crecer a distintos ritmos, observándose tiempos de duplicación menores a ~10 días y superiores a ~30 días en la mayoría de los casos (intervalo amplio de tasas de crecimiento a una misma temperatura).

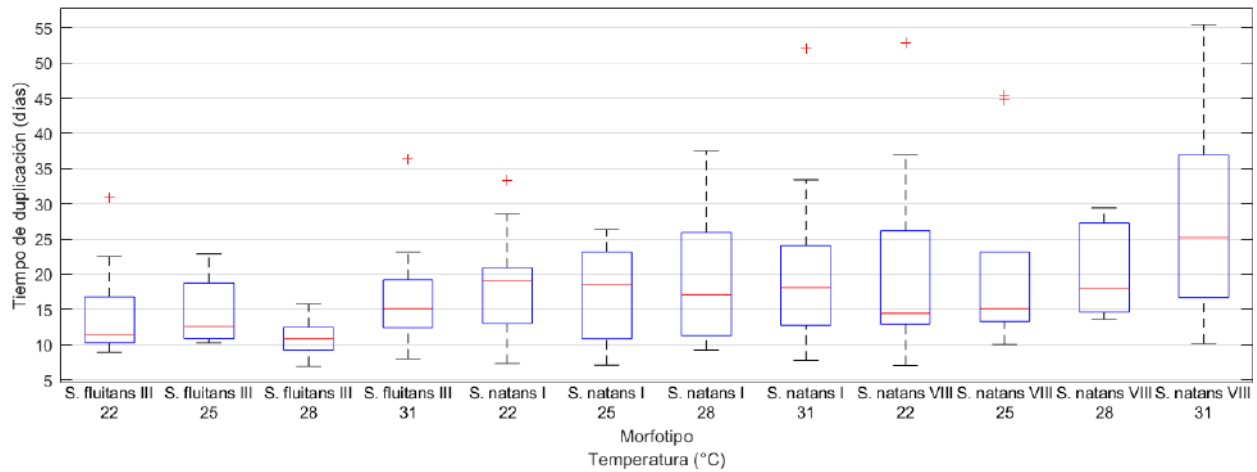


Fig. Ab1. Gráfico de cajas y bigotes del tiempo de duplicación del sargazo en función del morfotipo y de la temperatura.

Se construyó un gráfico de cajas y bigotes (Fig. Ab2) en donde se aprecia que por lo general *S. fluitans* III presenta tiempos de duplicación un poco menores, mientras que *S. natans* VIII un poco mayores. No obstante, los distintos morfotipos pueden presentar tiempos de duplicación similares (claro traslape en las cajas y bigotes), los cuales pueden ir desde 7 días hasta más de 30 días.

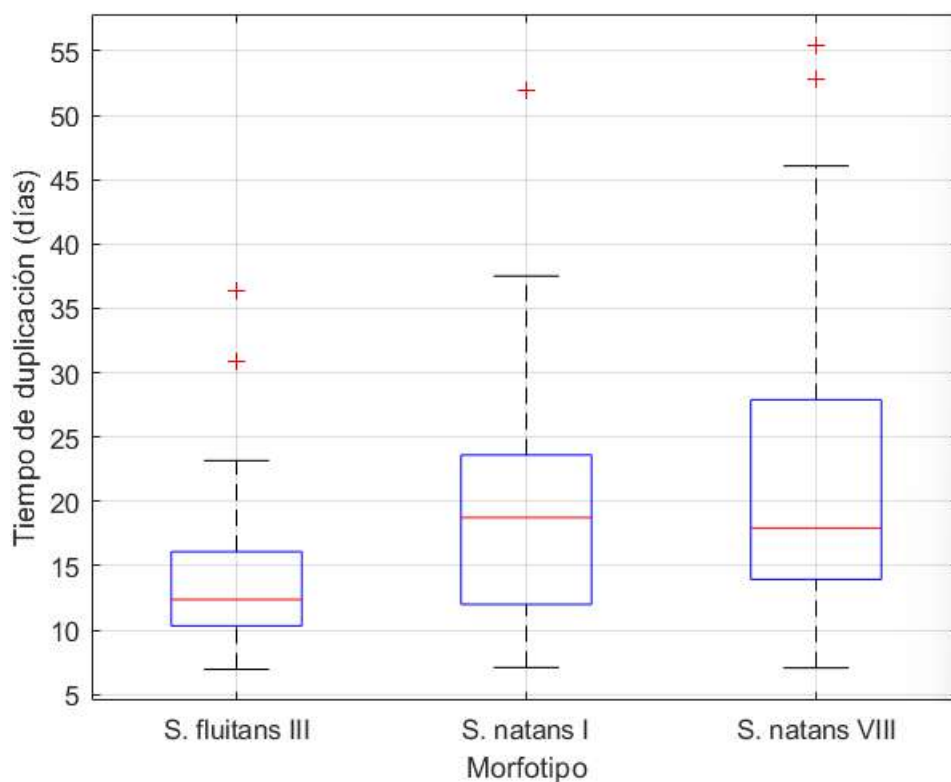


Fig. Ab2. Gráfico de cajas y bigotes del tiempo de duplicación del sargazo en función del morfotipo, sin hacer distinción por temperatura.

Se construyó un gráfico de cajas y bigotes (Fig. Ab3) en donde se observa que a distintas temperaturas ocurren tiempos de duplicación muy similares; el valor central es muy parecido y las cajas y los bigotes claramente se traslapan. La mediana en el tiempo de duplicación fue de ~15 días a las temperaturas de 22, 25 y 28 °C, mientras que a los 31°C fue un poco mayor, de ~18 días. Es decir, a los 31°C el valor central muestra un menor crecimiento de sargazo, aunque se siguen observando tiempos de duplicación entre 7 y más de 35 días (al igual que en las otras temperaturas). Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación (CC) de Pearson entre la temperatura y el tiempo de duplicación, obteniéndose un valor de $CC = 0.13$. Este valor es mucho más cercano a 0 que a 1 o -1, lo cual sugiere una dependencia lineal muy pobre entre los tiempos de duplicación y

la temperatura. Lo anterior está de acuerdo con lo reportado en Magaña-Gallegos et al. (2023b), por ejemplo:

- *“...which supports the statement by Skliris and collaborators [2] that “warming is not the driving the largest sargassum growth peaks over the last decade”. Instead, nutrient supply (i.e., N and P), rather than temperature, were proposed as the principal drivers of the sargasso bloom [2,15]. However, this does not imply that the temperature does not influence the phenology of sargasso at...”*
- *“...the response to the temperature varied depending on the time of the year.”*
- *“...we ignore whether these variable responses are due to their arrival history (e.g., having stored nutrients) or internal lifecycle mechanisms...”*
- *“Aside from temperature, many other factors could affect the growth of sargasso, and other relevant drivers, such as the nutrient reserves and the availability, salinity, light availability, their interactions, and possibly also inter-and intraspecific interactions, need to be considered.”*

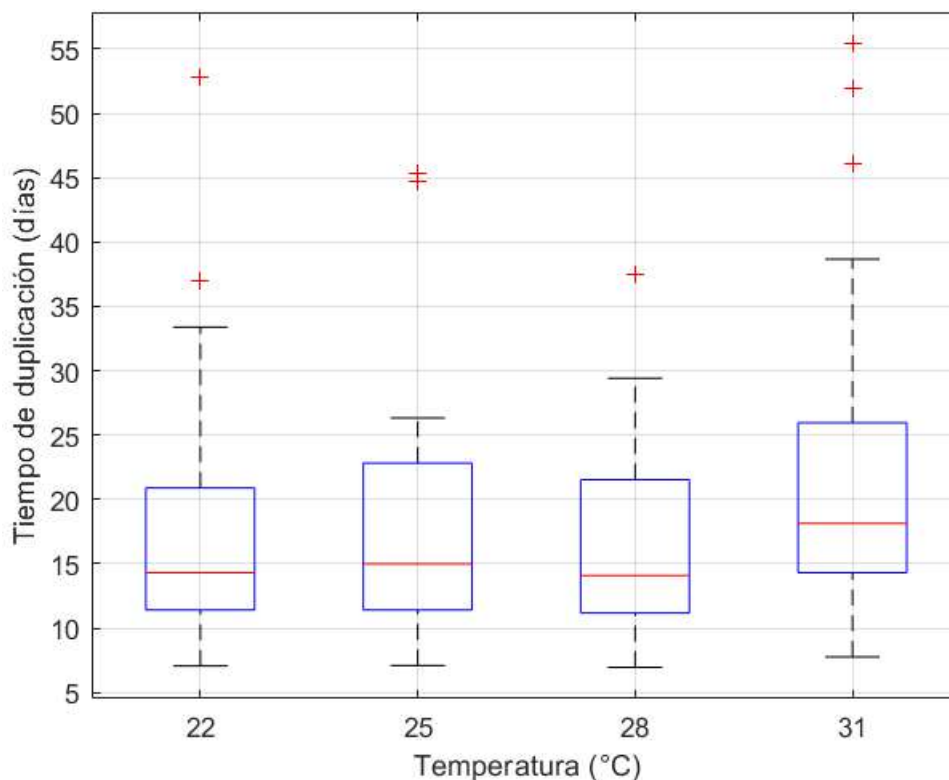


Fig. Ab3. Gráfico de cajas y bigotes del tiempo de duplicación del sargazo en función de la temperatura, sin hacer distinción del morfotipo.

Conclusión

No se encontró apropiado construir un modelo de crecimiento de sargazo a partir de la temperatura, porque a una misma temperatura se da un intervalo amplio de tasas de crecimiento, dicho intervalo es ampliamente compartido a distintas temperaturas, y el coeficiente de correlación entre la temperatura y las tasas de crecimiento es muy cercano a 0. Además, es notorio el contraste entre las tasas de crecimiento, bajo condiciones relativamente similares, que se reportan en distintos artículos científicos (Tabla I; Sección 3.2.2). Corbin y Oxenford (2023) declaran: *“Furthermore, current discrepancies in the results reported across different studies, will add to the uncertainties for model parameterization. As such, there is a clear need for studies to further explore and clarify how pelagic sargassum growth is influenced by morphotype physiology, variable environmental*

conditions and changes in nutrient demand and tissue reserves (e.g. Magaña-Gallegos et al., 2023a) before growth parameters can be usefully incorporated into medium and long-term forecast models to improve their accuracy.”

En el proyecto doctoral se implementó una primera aproximación (incapaz de diferenciar el crecimiento entre morfotipos) para estimar un escenario de crecimiento: el crecimiento en función del estado trófico del agua de mar (inferido por la concentración de clorofila-a) y de tasas de crecimiento reportadas por Lapointe et al. (2014), quienes han medido tasas de crecimiento en distintas regiones oceánicas y neríticas del Atlántico Noroccidental. Lapointe y colaboradores han encontrado en varias ocasiones (Lapointe, 1986, 1995; Lapointe et al., 2014; 2021) que por lo general hay una mayor productividad y crecimiento de sargazo en aguas con relativamente mayor contenido de nutrientes (aguas neríticas del Caribe Occidental y del Golfo de México) que en aguas oligotróficas del mar abierto (aguas oceánicas relativamente cercanas a Bermuda y Bahamas). Por lo anterior se decidió buscar una relación entre las tasas de crecimiento en Lapointe et al. (2014) y la concentración de clorofila-a inferida satelitalmente, teniendo en mente que la clorofila-a es un indicador aproximado del estado trófico del agua de mar. Se encontró una fuerte correlación ($CC=0.97$) entre la concentración satelital de clorofila a y las tasas de crecimiento en Lapointe et al. (2014), la cual es mucho mayor ($CC=0.13$) que la correlación entre temperatura y las tasas de crecimiento reportadas por Magaña-Gallegos et al. (2023b). El modelo de crecimiento implementado estima tiempos de duplicación (de 7 a 16 días) del sargazo en la región de Puerto Morelos que son similares a los reportados por Magaña-Gallegos et al. (2023a, 2023b), mientras que para la región oceánica del Caribe mexicano estima tiempos de duplicación (de 26 a 38 días) que son similares a los reportados por Lapointe (1986) para de *S. fluitans* III (32 días) y *S. natans* I (29 días) en aguas oceánicas cerca de Bahamas.

El modelo de crecimiento en la tesis no incluye el efecto de otros factores como reserva interna de nutrientes o mecanismos internos de ciclo de vida, pero aún no se conoce lo suficiente sobre estos, y no se tiene la información necesaria para parametrizar y validar modelos que busque representarlos de manera realista. La intención del modelo de crecimiento usado en la tesis es simplemente proporcionar una primera idea de cuánto podría crecer el sargazo debido al estado trófico del agua del Caribe mexicano. Entender esto es entender una parte del crecimiento del sargazo en el área de estudio, la cual nos permitió inferir algo que también es importante para las relaciones internacionales: la mayor parte de la biomasa de sargazo que arriba al Caribe mexicano no se generó por nutrientes locales, y el Caribe mexicano no es un principal proveedor de nutrientes para la proliferación masiva de las mareas doradas. Estamos conscientes de que el modelo de crecimiento implementado es sumamente limitado, pero se construyó con la poca información disponible, y podrá ser mejorado en la medida en que se cuente con información biológica clara que permita una mejor calibración y validación.

Referencias

- Abdolali A, Van Der Westhuysen A, Ma Z, et al. (2021) Evaluating the Accuracy and Uncertainty of Atmospheric and Wave Model Hindcasts During Severe Events Using Model Ensembles. *Ocean Dynam* 71, 217–235
- Addico G, Degraft-Johnson K (2016) Preliminary Investigation into the Chemical Composition of the Invasive Brown Seaweed *Sargassum* Along the West Coast of Ghana. *African J Biotech* 15, 2184-2191.
- Agrawal A (2001) Sexual Selection and the Maintenance of Sexual Reproduction. *Nature* 411, 692–695.
- Aguilar-Rosas L, Aguilar-Rosas R, Lora-Sánchez D (2003) Record Size for *Gelidium Robustum* (Gardner) Hollenberg Et Abbott (Gelidiales, Rhodophyta) in the Pacific Coast of México. *Oceánides* 18, 83-85.
- Aguilera-Méndez J, Juárez-Toledo C, Tapia-Fabela J, et al. (2023). Modelación Numérica de la Trayectoria del Sargazo Pelágico Utilizando Ecuaciones Brownianas con Aplicación a las Aguas de la Península de Yucatán, México. *Ingeniería Del Agua* 27, 45–58.
- Aguirre-Gómez R (2018) Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). *Invest Geof* 96, 1-6.
- Albert A, Brisson J, Belzile F (2015) Strategies for a Successful Plant Invasion: the Reproduction of *Phragmites australis* in North-Eastern North America. *J Ecol* 103, 1529-1537.

- Allende-Arandía ME, Zavala-Hidalgo J, Torres-Freyermuth A, et al. (2020) Sea-Land Breeze Diurnal Component and Its Interaction with a Cold Front on the Shore of Sisal, Yucatán: A Case Study. *Atmos Res* 244, 105051.
- Allende-Arandía M, Duran R, Sanvicente-Añorve L, et al. (2023) Lagrangian Characterization of Surface Transport from the Equatorial Atlantic to the Caribbean Sea Using Climatological Lagrangian Coherent Structures and Self-Organizing Maps. *J Geophys Res: Oceans*, 128, e2023JC019894.
- Alleyne K, Small M, Corbin M, et al. (2023) Free-Swimming Fauna Associated with Influxes of Pelagic *Sargassum*: Implications for Management and Harvesting. *Front Mar Sci* 10, 1090742.
- Alleyne K, Neat F, Oxenford H (2023b) An Analysis of Arsenic Concentrations Associated with *Sargassum* Influx Events in Barbados. *Mar Pollut Bull* 192, 115064.
- Amador J (2008) The Intra-Americas Sea Low-Level Jet: Overview and Future Research. *Ann NY Acad Sci* 1146, 153-188.
- Amador-Castro F, García-Cayuela T, Alper H, et al. (2021) Valorization of Pelagic *Sargassum* Biomass into Sustainable Applications: Current Trends and Challenges. *J Environ Manage* 283, 112013.
- Andrade C, Barton E (2005) The Guajira Upwelling System. *Cont Shelf Res* 25, 1003-1022.
- Antonio-Martínez F, Henaut Y, Vega-Zepeda A, et al. (2020) Leachate Effects of Pelagic *Sargassum* spp. on Larval Swimming Behavior of the Coral *Acropora palmata*. *Sci Rep* 10, 3910.

- Bach L, Tamsitt, V, Gower J, et al. (2021) Testing the Climate Intervention Potential of Ocean Afforestation Using the Great Atlantic *Sargassum* Belt. *Nat Commun* 12, 2556.
- Baker P, Minzlaff U, Schoenle A, et al. (2018) Potential Contribution of Surface-Dwelling *Sargassum* Algae to Deep-Sea Ecosystems in the Southern North Atlantic. *Deep Sea Res Part II: Top Stud Oceanogr* 148, 21-34.
- Bam W, Swarzenski P, Maiti K, et al. (2022) Scavenging of Select Radionuclides and Trace Elements by Pelagic *Sargassum* in the Caribbean Sea. *Mar Pollut Bull* 179, 113658.
- Bao M, Park J-S, Wu H, et al. (2022) A Comparison of Physiological Responses Between Attached and Pelagic Populations of *Sargassum horneri* Under Nutrient and Light Limitation. *Mar Environ Res* 173, 105544.
- Barberton Z (2023) Drowning in Seaweed: How to Stop Invasive *Sargassum*. *Nature* PMID, 36702965.
- Barsanti L, Coltelli P, Evangelista V, et al. (2008) The World of Algae. En: Evangelista V, Barsanti L, Frassanito A, et al. (Eds.) *Algal Toxins: Nature, Occurrence, Effect and Detection*. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Springer, Dordrecht.
- Bartlett D, Elmer F (2021) The Impact of *Sargassum* Inundations on the Turks and Caicos Islands. *Phycology* 1, 83-104.
- Bates N, Johnson R (2020) Acceleration of Ocean Warming, Salinification, Deoxygenation and Acidification in the Surface Subtropical North Atlantic Ocean. *Commun Earth Environ* 1, 33.

- Bauer-Gottwein P, Gondwe B, Charvet G, et al. (2011) Review: the Yucatán Peninsula Karst Aquifer, Mexico. *Hydrogeol J* 19, 507-524.
- Baumann J, Ries J, Rippe J, et al. (2019) Nearshore Coral Growth Declining on the Mesoamerican Barrier Reef System. *Glob Chang Biol* 25, 3932-3945.
- Benavides M, Voss M (2015) Five Decades of N₂ Fixation Research in the North Atlantic Ocean. *Front Mar Sci* 2, 40.
- Berline L, Ody A, Jouanno J, et al. (2020) Hindcasting the 2017 Dispersal of *Sargassum* Algae in the Tropical North Atlantic. *Mar Pollut Bull* 158, 111431.
- Bermejo R, Green-Gavrielidis L, Gao G (2023) Editorial: Macroalgal Blooms in A Global Change Context. *Front Mar Sci* 10, 1204117.
- Bernard D, Biabiany E, Cécé R, et al. (2022) Clustering Analysis of the *Sargassum* Transport Process: Application to Beaching Prediction in the Lesser Antilles. *Ocean Sci* 18, 915-935.
- Beron-Vera F (2021) Nonlinear Dynamics of Inertial Particles in the Ocean: from Drifters and Floats to Marine Debris and *Sargassum*. *Nonlinear Dyn* 103, 1-26.
- Beron-Vera F, Miron P (2020) A Minimal Maxey–Riley Model for the Drift of *Sargassum* Rafts. *J Fluid Mech* 904, A8.
- Bertoni D, Sarti G, Grottoli E, et al. (2016) Impressive Abrasion Rates of Marked Pebbles on a Coarse-Clastic Beach Within a 13-Month Timespan. *Mar Geol* 381, 175-180.
- Beuder S, Braybrook S (2023) Brown Algal Cell Walls and Development. *Semin Cell Dev Biol* 134, 103-111.

- Bird E, Lewis N (2015) Causes of Beach Erosion. En: Bird E, Lewis N (Eds.) Beach Renourishment. Springer Briefs in Earth Sciences. Springer, Cham.
- Biswas B, Chatterjee S, Mukherjee S, et al. (2013) A Discussion on Euler Method: A Review. *J Math Anal Appl* 1, 294-317.
- Blanke B, Raynaud S (1997) Kinematics of the Pacific Equatorial Undercurrent: An Eulerian and Lagrangian Approach from GCM Results. *J Phys Oceanogr* 27, 1038-1053.
- Bleck R (2002) An Oceanic General Circulation Model Framed in Hybrid Isopycnic-Cartesian Coordinates. *Ocean Model* 4, 55-88.
- Bonjean F, Lagerloef G (2002) Diagnostic Model and Analysis of the Surface Currents in the Tropical Pacific Ocean. *J Phys Oceanogr* 32, 2938-2954.
- Bosboom J, Stive M (2021) Coastal Dynamics. TU Delft Open. <https://doi.org/10.5074/T.2021.001>
- Bovik A (2009) Chapter 3: Basic Gray Level Image Processing. En: Bovik A (Ed.) The Essential Guide to Image Processing. *Academic Press* Pp. 43-68.
- Boyd P, Bach L, Hurd C, et al. (2022) Potential Negative Effects of Ocean Afforestation on Offshore Ecosystems. *Nat Ecol Evol* 6, 675-683.
- Bringloe T, Starko S, Wade R, et al. (2020): Phylogeny and Evolution of the Brown Algae. *Crit Rev Plant Sci* 39, 281-321.
- Brinkert K (2018) Oxygenic Photosynthesis—A Brief Overview. En: Brinkert K (Ed.) Energy Conversion in Natural and Artificial Photosynthesis. Springer Series in Chemical Physics, Vol 117. Springer, Cham.

- Broad K, Leiserowitz A, Wrinkle J, et al. (2007) Misinterpretations of the “Cone of Uncertainty” in Florida During the 2004 Hurricane Season. *Bull Am Meteorol Soc* 88, 651-668.
- Brockmann C, Stelzer K (2022) Global Reprocessed Observation Product for the Atlantic and Arctic Observation Products. Copernicus Marine Service. 24 Pp.
- Brooks M, Coles V, Hood R, et al. (2018) Factors Controlling the Seasonal Distribution of Pelagic *Sargassum*. *Mar Ecol Prog Ser* 599, 1-18.
- Brooks M, Coles V, Coles W (2019) Inertia Influences Pelagic *Sargassum* Advection and Distribution. *Geophys Res Lett* 46, 2610-2618.
- Brown P, Zhao F-J, Dobermann A (2022) What Is a Plant Nutrient? Changing Definitions to Advance Science and Innovation in Plant Nutrition. *Plant Soil* 476, 11-23.
- Broyer T, Stout P (1959) The Macronutrient Elements. *Ann Rev Plant Physiol* 10, 277-300.
- Burki F, Roger A, Brown M, et al. (2019) The New Tree of Eukaryotes. *Trends Ecol Evol* 35, 43-55.
- Butler J, Morris B, Cadwallader J, et al. (1983) Studies of *Sargassum* and the *Sargassum* Community. *Bermuda Biol Stn Spec Publ* 22.
- Cacabelos E, Olabarria C, Incera M, et al. (2010) Do Grazers Prefer Invasive Seaweeds? *J Exp Mar Biol Ecol* 393, 182-187.
- Cahuich-López M, Mariño-Tapia I, Souza A, et al. (2020) Spatial and Temporal Variability of Sea Breezes and Synoptic Influences Over the Surface Wind Field of the Yucatán Peninsula. *Atmosfera* 33, 123-142.

- Camacho-Cruz K, Rey-Villiers N, Ortiz-Hernández M, et al. (2022) Changes in the Enrichment of Dissolved Inorganic Nutrients in the Coastal Waters of the Mexican Caribbean, Influenced by Submarine Groundwater Discharges 2016–2019. *Mar Pollut Bull* 185, 114308.
- Carpenter E, Cox J (1974) Production of Pelagic *Sargassum* and a Blue Green Epiphyte in the Western Sargasso Sea. *Limnol Oceanogr* 19, 429-436.
- Carrillo L, Palacios-Hernández E, Yescas M, et al. (2009) Spatial and Seasonal Patterns of Salinity in a Large and Shallow Tropical Estuary of the Western Caribbean. *Estuaries Coast* 32, 906-916.
- Carrillo L, Johns E, Smith R, et al. (2015) Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Cont Shelf Res* 109, 164-176.
- Carrillo L, Johns E, Smith R, et al. (2016) Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 2: Water Masses and Thermohaline Structure. *Cont Shelf Res* 120, 41-58.
- Carrillo L, Lamkin J, Johns E, et al. (2017) Linking Oceanographic Processes and Marine Resources in the Western Caribbean Sea Large Marine Ecosystem Subarea. *Environ Dev* 22, 84-96.
- Carrillo L, Sheinbaum J (2020) Sargazo en Movimiento. *Ciencia* 71, 20-27.
- Carruthers T, Van Tussenbroek B, Dennison W (2005) Influence of Submarine Springs and Wastewater on Nutrient Dynamics of Caribbean Seagrass Meadows. *Estuar Coast Shelf Sci* 64, 191-199.

- Casazza T (2008) Community Structure and Diets of Fishes Associated with Pelagic *Sargassum* and Open-Water Habitats Off North Carolina. University of North Carolina Wilmington, Tesis De Maestría.
- Casazza T, Ross S (2008) Fishes Associated with Pelagic *Sargassum* and Open Water Lacking *Sargassum* in the Gulf Stream Off North Carolina. *Fish Bull* 106, 348-363.
- Castro-González M, Carrillo-Domínguez S, Pérez-Gil F (1994) Chemical Composition of *Macrocystis pyrifera* (Giant Sargazo) Collected in Summer and Winter and Its Possible Use in Animal Feeding. *Cienc Mar* 20, 33-40.
- Centurioni L, Niiler P (2003) On the Surface Currents of the Caribbean Sea. *Geophys Res Lett* 30, 1279.
- Cerdeira-Estrada S, Martell-Dubois R, Heege T, et al. (2022) Satellite Bathymetry Map of the Marine Ecosystems in the Mexican Caribbean: Cabo Catoche - Xcalak. SIMAR, CONABIO, <https://simar.conabio.gob.mx/arrecifesam/#batimetria>.
- Cetina P, Candela J, Sheinbaum J, et al. (2006) Circulation Along the Mexican Caribbean Coast. *J Geophys Res* 111, C08021.
- Chadee X, Clarke R (2015) Daily Near-Surface Large-Scale Atmospheric Circulation Patterns Over the Wider Caribbean. *Clim Dyn* 44, 2927-2946.
- Chang Y-S, Zhang S, Rosati A, et al. (2013) An Assessment of Oceanic Variability for 1960–2010 from the GFDL Ensemble Coupled Data Assimilation. *Clim Dyn* 40, 775-803.

- Changeux T, Berline L, Podlejski W, et al. (2023) Variability in Growth and Tissue Composition (CNP, Natural Isotopes) of the Three Morphotypes of Holopelagic *Sargassum*. *Aquat Bot* 187, 103644.
- Chávez V, Uribe-Martínez A, Cuevas E, et al. (2020) Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water* 12, 2908.
- Chen C, Liu H, Beardsley R (2003) An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *J Atmos Oceanic Technol* 20, 159-186.
- Chen B, Stephenson W (2014) Measuring Pebble Abrasion on a Mixed Sand and Gravel Beach Using Abrasion Baskets. *Geomorphology* 248, 24-32.
- Cipolloni O-A, Gigault J, Dassié É, et al. (2022) Metals and Metalloids Concentrations in Three Genotypes of Pelagic *Sargassum* from the Atlantic Ocean Basin-Scale. *Mar Pollut Bull* 178, 113564.
- Colella S, Böhm E, Cesarini C, et al. (2022) Product User Manual for Ocean Colour Products. Copernicus Marine Service. 224 Pp.
- Condal A, Vega-Moro A, Ardisson P (2013) Climatological, Annual, and Seasonal Variability in Chlorophyll Concentration in the Gulf of Mexico, Western Caribbean, and Bahamas Using NASA Colour Maps. *Int J Remote Sens* 34, 1591-1614.
- Corbin M, Oxenford H (2023) Assessing Growth of Pelagic *Sargassum* in the Tropical Atlantic. *Aquat Bot* 187, 103654.

- Coronado C, Candela J, Iglesias-Prieto R, et al. (2007) On the Circulation in the Puerto Morelos Fringing Reef Lagoon. *Coral Reefs* 26, 149-163.
- Coston-Clements L, Settle L, Hoss D, et al. (1991) Utilization of the *Sargassum* Habitat by Marine Invertebrates and Vertebrates: A Review. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-296.
- Cox J, House D, Lindell M (2013) Visualizing Uncertainty in Predicted Hurricane Tracks. *Int J Uncertain Quantif* 3, 143-156.
- Crow J (1994), Advantages of Sexual Reproduction. *Dev Genet* 15, 205-213.
- Cruz K, Toonen R, Rachid C, et al. (2017) Clone Wars: Asexual Reproduction Dominates in the Invasive Range of *Tubastraea* spp. (Anthozoa: Scleractinia) in the South-Atlantic Ocean. *Peerj* 5, E3873.
- Cuevas E, Uribe-Martínez A, Liceaga-Correa M (2018) A Satellite Remote-Sensing Multi-Index Approach to Discriminate Pelagic *Sargassum* in the Waters of the Yucatán Peninsula, Mexico. *Int J Remote Sens* 39, 3608-3627.
- Cuevas E, Flores-Vidal X, Uribe-Martínez A (2023) Las Autopistas del Sargazo en el Caribe Mexicano. *La Jornada Ecológica* 263, 19-20.
- Cummings J (2005) Operational Multivariate Ocean Data Assimilation. *Quart J Royal Met Soc Part C* 131, 3583-3604.
- Dassié E, Gourves P, Cipolloni O, et al. (2022) First Assessment of Atlantic Open Ocean *Sargassum* spp. Metal and Metalloid Concentrations. *Environ Sci Pollut Res* 29, 17606-17616.

- Dauhajre D, McWilliams J, Renault L (2019) Nearshore Lagrangian Connectivity: Submesoscale Influence and Resolution Sensitivity. *J Geophys Res: Oceans* 124, 5180-5204.
- Da Cunha L, Buitenhuis E, Le Quéré C, et al. (2007) Potential Impact of Changes in River Nutrient Supply on Global Ocean Biogeochemistry. *Global Biogeochem Cycles* 21, GB4007.
- De Boer M, Saulino J (2020) Marine Megafauna (Cetaceans, Turtles, Seabirds & Elasmobranchs) Associate with Pelagic *Sargassum* off Suriname. *Acad J Suriname* 11, 41-66.
- De Jesús-Navarrete A (2003) Physical Characterization of the Reef Lagoon at Banco Chinchorro, Mexico: An Overview. *Bull Mar Sci* 73, 5-14.
- De Souza C, Silva F, Duarte D, et al. (2020) What do We Know About the Utilization of the *Sargassum* Species as Biosorbents of Trace Metals in Brazil? *J Environ Chem Eng* 8, 103941.
- De Vienne D (2022) What Is A Phenotype? History and New Developments of the Concept. *Genetica* 150, 153-158.
- Dean R, Walton T, Rosati J, et al. (2013) Beach Erosion: Causes and Stabilization. En: Finkl C (Ed.) Coastal Hazards. Coastal Research Library, Vol 1000. Springer, Dordrecht.
- Deniaud-Bouët E, Kervarec N, Michel G, et al. (2014) Chemical and Enzymatic Fractionation of Cell Walls from Fucales: Insights into the Structure of the Extracellular Matrix of Brown Algae. *Ann Bot* 114, 1203-16.
- Deniaud-Bouët E, Hardouin K, Potin P, et al. (2017) A Review About Brown Algal Cell Walls and Fucose-Containing Sulfated Polysaccharides: Cell Wall Context, Biomedical Properties and Key Research Challenges. *Carbohydr Polym* 175, 395-408.

- Desrochers A, Cox S-A, Oxenford H, et al. (2022) Pelagic *Sargassum* - A Guide to Current and Potential Uses in the Caribbean. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 686. Rome, FAO.
- Devault D, Pierre R, Marfaing H, et al. (2021a) *Sargassum* Contamination and Consequences for Downstream Uses: A Review. *J Appl Phycol* 33, 567-602.
- Devault D, Modestin E, Cottureau V, et al. (2021b) The Silent Spring of *Sargassum*. *Environ Sci Pollut Res* 28, 15580-15583.
- Devault D, Massat F, Lambourdière J, et al. (2022) Micropollutant Content of *Sargassum* Drifted Ashore: Arsenic and Chlordecone Threat Assessment and Management Recommendations for the Caribbean. *Environ Sci Pollut Res* 29, 66315-66334.
- Dewitt T, Scheiner S (2004) Phenotypic Variation from Single Genotypes. En: Dewitt T, Scheiner S (Eds.) Phenotypic Plasticity: Functional and Conceptual Approaches. Oxford University Press, New York.
- Dibner S, Martin L, Thibaut T, et al. (2021) Consistent Genetic Divergence Observed Among Pelagic *Sargassum* Morphotypes in the Western North Atlantic. *Mar Ecol* 43, E12691.
- Doubleday Z, Connell S (2018) Weedy Futures: Can We Benefit from the Species That Thrive in the Marine Anthropocene? *Front Ecol Environ* 16, 599-604.
- Droghei R, Nardelli B, Santoleri R (2018) A New Global Sea Surface Salinity and Density Dataset from Multivariate Observations (1993–2016). *Front Mar Sci* 5, 84.
- Egan S, Harder T, Burke C, et al. (2013) The Seaweed Holobiont: Understanding Seaweed–Bacteria Interactions. *FEMS Microbiol Rev* 37, 462-476.

- Emanuel K (2017) Will Global Warming Make Hurricane Forecasting More Difficult? *Bull Am Meteorol Soc* 98, 495-501.
- Estrada-Medina H, Jiménez-Osornio J, Álvarez-Rivera O, et al. (2019) The Karst of Yucatan: Its Origin, Morphology and Biology. *Acta Univ* 29, E2292.
- Ezer T, Thattai D, Kjerfve B, et al. (2005) On the Variability of the Flow Along the Meso-American Barrier Reef System: A Numerical Model Study of the Influence of the Caribbean Current and Eddies. *Ocean Dyn* 55, 458-475.
- Fairbridge R (1968) Lagoon (Coral-Reef Type). En: *Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Falkowski P (1994) The Role of Phytoplankton Photosynthesis in Global Biogeochemical Cycles. *Photosynth Res* 39, 235-258.
- Falkowski, P (2012) Ocean Science: The Power of Plankton. *Nature* 483, S17–S20.
- Ferrer L, Pastor A (2017) The Portuguese man-of-war: Gone with the wind. *Reg Stud Mar Sci* 14, 53-62.
- Fidai Y, Dash J, Tompkins E, et al. (2020) A Systematic Review of Floating and Beach Landing Records of *Sargassum* Beyond the Sargasso Sea. *Environ.Res Commun* 2 122001.
- Fidai Y, Machado C, Dominguez V, et al. (Preprint) Innovative Spectral Characterization of Beached Pelagic *Sargassum* Towards Remote Estimation of Biochemical and Phenotypic Properties. <http://Dx.Doi.Org/10.2139/Ssrn.4457615>
- Filippi M, Hadjighasem A, Rayson M, et al. (2021) Investigating Transport in a Tidally Driven Coral Atoll Flow Using Lagrangian Coherent Structures. *Limnol Oceanogr* 66, 4017-4027.

- Fleury A, Drazen J (2013) Abyssal Scavenging Communities Attracted to *Sargassum* and Fish in the Sargasso Sea. *Dep Sea Res* 172, 141-147.
- Forterre P (2015) The Universal Tree of Life: An Update. *Front Microbiol* 6, 717.
- Fraga J, Robledo D (2022) Covid-19 and *Sargassum* Blooms: Impacts and Social Issues in a Mass Tourism Destination (Mexican Caribbean). *Marit Stud* 21, 159–171.
- Franks J, Johnson D, Ko D (2016) Pelagic *Sargassum* in the Tropical North Atlantic. *Gulf Caribb Res* 27, SC6-SC11.
- Fusco G, Minelli A (2010) Phenotypic Plasticity in Development and Evolution: Facts and Concepts. *Phil. Trans R Soc B* 365, 547–556.
- García-Sánchez M, Graham C, Vera E, et al. (2020) Temporal Changes in the Composition and Biomass of Beached Pelagic *Sargassum* Species in the Mexican Caribbean. *Aquat Bot* 167, 103275.
- Gargano F, Garofalo G, Quattrocchi F, et al. (2022) Where do Recruits Come From? Backward Lagrangian Simulation for the Deep Water Rose Shrimps in the Central Mediterranean Sea. *Fish Oceanogr* 31, 369-383.
- Garza-Pérez J, Lehmann A, Arias-González J (2004) Spatial Prediction of Coral Reef Habitats: Integrating Ecology with Spatial Modeling and Remote Sensing. *Mar Ecol Prog Ser* 269, 141-152.
- Gavio B, Santos-Martínez A. (2018) Floating *Sargassum* in Serranilla Bank, Caribbean Colombia, May Jeopardize the Race to the Ocean of Baby Sea Turtles. *Acta Biol Colomb* 23, 311-314.

- Gil M, Renfro B, Figueroa-Zavala B, et al. (2015) Rapid Tourism Growth and Declining Coral Reefs in Akumal, Mexico. *Mar Biol* 162, 2225-2233.
- Gjuvslund A, Vik J, Beard D, et al. (2013) Bridging the Genotype–Phenotype Gap: What Does It Take? *J Physiol* 591, 2055-2066.
- Godínez-Ortega J, Cuatlán-Cortés J, López-Bautista J, et al. (2021) A Natural History of Floating *Sargassum* Species (Sargasso) from Mexico. En: Hufnagel L (Ed.) Natural History and Ecology of Mexico and Central America. London, UK: *Intechopen*.
- González-Nieto D, Oliveira M, Núñez M, et al. (2020) Molecular Assessment of the Genus *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from the Mexican Coasts of the Gulf of Mexico and Caribbean, with the Description of *S. Xochitlae* sp. Nov. *Phytotaxa* 461, 254-274.
- Goodwin D, Siuda A, Schell J (2022) In Situ Observation of Holopelagic *Sargassum* Distribution and Aggregation State Across the Entire North Atlantic from 2011 to 2020. *Peerj* 10, E14079.
- Gouvêa L, Horta P, Fragkopoulou E, et al. (2023) Phenotypic Plasticity in *Sargassum* Forests May Not Counteract Projected Biomass Losses Along a Broad Latitudinal Gradient. *Ecosystems* 26, 29-41.
- Gower J, King S (2011) Distribution of Floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico and the Atlantic Ocean Mapped Using MERIS. *Int J Remote Sens* 32, 1917-1929.
- Gower J, Young E, King S (2013) Satellite Images Suggest a New *Sargassum* Source Region in 2011, *Remote Sens Lett* 4, 764-773.

- Gower J, King S (2019) The Distribution of Pelagic *Sargassum* Observed with OLCI. *Int J Remote Sens* 4, 5669-5679.
- Graham R, Hudson S, Maturilli M (2019) Improved Performance of ERA5 in Arctic Gateway Relative to Four Global Atmospheric Reanalyses. *Geophys Res Lett* 46, 6138-6147.
- Gray L, Bisonó L, Rojas F, et al. (2021) Caribbean-Wide, Negative Emissions Solution to *Sargassum* spp. Low-Cost Collection Device and Sustainable Disposal Method. *Phycology* 1, 49-75.
- Gress E, Voss J, Eckert R, et al. (2019) The Mesoamerican Reef. En: Loya Y, Puglise K, Bridge T (Eds.) Mesophotic Coral Ecosystems. Coral Reefs of the World, Vol 12. Springer, Cham.
- Gregg W, Casey N, McClain C (2005) Recent Trends in Global Ocean Chlorophyll. *Geophys Res Lett* 32, L03606.
- Guimaraes M, Zúñiga-Ríos A, Cruz-Ramírez C, et al. (2021) The Conservational State of Coastal Ecosystems on the Mexican Caribbean Coast: Environmental Guidelines for Their Management. *Sustainability* 13, 2738.
- Guiry M (2022) *Sargassum* C. Agardh, 1820, Nom. et Typ. Cons. En: Guiry M Y Guiry G (Eds.) Algaebase. World-Wide Electronic Publication, National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>
- Halliwell G, Weisberg R, Mayer D (2003) A Synthetic Float Analysis of Upper-Limb Meridional Overturning Circulation Interior Ocean Pathways in the Tropical/Subtropical Atlantic. En: Goni G, Malanotte-Rizzoli P (Eds.) Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean. *Elsevier Sci* 68, 93-136.

- Hanisak M, Samuel M (1987) Growth Rates in Culture of Several Species of *Sargassum* from Florida, USA. *Hydrobiologia* 151, 399-404.
- Havel J, Kovalenko K, Thomaz S, et al. (2015) Aquatic Invasive Species: Challenges for the Future. *Hidrobiologia* 750, 147-170.
- Hendy I, Woolford K, Vincent-Piper A, et al. (2021) Climate-Driven Golden Tides Are Reshaping Coastal Communities in Quintana Roo, Mexico. *Clim Change Ecol* 2, 100033
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146, 1999-2049.
- Hill B (2016) An Analysis of the Factors That Influence the *Sargassum* Migratory Loop. Texas A&M University. Tesis De Maestría, 30 Pp.
- Ho T-Y, Quigg A, Kinkel Z, et al. (2003) The Elemental Composition of Some Marine Phytoplankton. *J Phycol* 39, 1145-1159.
- Höök M, Tang X (2013) Depletion of Fossil Fuels and Anthropogenic Climate Change—A Review. *Energy Policy* 52, 797-809.
- Howell L, Shaver D (2021) Foraging Habits of Green Sea Turtles (*Chelonia mydas*) In the Northwestern Gulf of Mexico. *Front Mar Sci* 8, 658368.
- Hu C, Feng L, Hardy R, et al. (2015) Spectral and Spatial Requirements of Remote Measurements of Pelagic *Sargassum* Macroalgae. *Remote Sens Environ* 167, 229-246.
- Hu C, Murch B, Barnes B, et al. (2016) *Sargassum* Watch Warns of Incoming Seaweed. *Eos* 97, 10-15.

- Hu C, Wang M, Lapointe B (2021) On the Atlantic Pelagic *Sargassum*'s Role in Carbon Fixation and Sequestration. *Sci Tot Environ* 781, 146801.
- Ignatiades L (2005) Scaling the Trophic Status of the Aegean Sea, Eastern Mediterranean. *J Sea Res* 54, 51-57.
- Jerard B, Damodaran V, Jaisankar I, et al. (2008) Chapter 6 - Coconut Biodiversity – Nature's Gift to the Tropical Islands. En: Sivaperuman S, Velmurugan A, Singh A, et al. (Eds.) Biodiversity and Climate Change Adaptation in Tropical Islands, *Academic Press*, Pp. 145-185,
- Jiang L, Carter B, Feely R, et al. (2019) Surface Ocean pH and Buffer Capacity: Past, Present and Future. *Sci Rep* 9, 18624.
- Jickells T, An Z, Andersen K, et al. (2005) Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science* 308, 67-71.
- Jickells T, Baker A, Chance R (2016) Atmospheric Transport of Trace Elements and Nutrients to the Oceans. *Phil Trans R Soc A* 374, 20150286.
- Johns E, Lumpkin R, Putman N, et al. (2020) The Establishment of a Pelagic *Sargassum* Population in the Tropical Atlantic: Biological Consequences of a Basin-Scale Long Distance Dispersal Event. *Prog Oceanogr* 182, 102269.
- Johnson D, Richardson P (1977) On the Wind-Induced Sinking of *Sargassum*. *J Exp Mar Biol. Ecol* 28, 255-267.
- Johnson E, Bonjean F, Lagerloef G, et al. (2007) Validation and Error Analysis of OSCAR Sea Surface Currents. *J Atmos Oceanic Technol* 24, 688-701.

- Johnson C, Dubbs L, Piehler M (2023) Reframing the Contribution of Pelagic *Sargassum* Epiphytic N₂ fixation. *PLoS ONE* 18, e0289485
- Jordán-Dahlgren E, Rodríguez-Martínez R (2003) The Atlantic Coral Reefs of Mexico. En: Cortés J (Ed.) *Latin American Coral Reefs*. Elsevier Science. Pp. 131-158.
- Jouanno J, Benschila R, Berline L, et al. (2021) A NEMO-Based Model of *Sargassum* Distribution in the Tropical Atlantic: Description of the Model and Sensitivity Analysis (NEMO-Sarg1.0). *Geosci Model Dev* 14, 4069-4086.
- Kämpf J, Chapman P (2016) *Upwelling Systems of the World: A Scientific Journey to the Most Productive Marine Ecosystems*. *Springer Cham* 433 Pp.
- Kantachumpoo A, Uwai S, Noiraksar T, et al. (2015) Systematics of Marine Brown Alga *Sargassum* from Thailand: A Preliminary Study Based on Morphological Data and Nuclear Ribosomal Internal Transcribed Spacer 2 (ITS2) Sequences. *Ocean Sci J* 50, 251-262.
- Kilar J, Hanisak M, Yoshida T (1992) On the Expression of Phenotypic Variability: Why Is *Sargassum* so Taxonomically Difficult? En: Abbott A (Ed.) *Taxonomy of Economic Seaweeds, with Reference to Some Pacific and Western Atlantic Species Volume III*. California Sea Grant College, University of Hawaii at Manoa, 241 Pp.
- Kirkby E (2012) Introduction, Definition and Classification of Nutrients. En: Marschner P (Ed.) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3^a Ed. Academic Press, Elsevier, 651 pp.
- Kloareg B, Badis Y, Cock J, et al. (2021) Role and Evolution of the Extracellular Matrix in the Acquisition of Complex Multicellularity in Eukaryotes: A Macroalgal Perspective. *Genes* 12, 1059.

- Kourafalou V, De Mey P, Staneva J, et al. (2015) Coastal Ocean Forecasting: Science Foundation and User Benefits. *J Oper Oceanogr* 8, S147-S167.
- Kumar H, Singh H (1979) Phaeophyta. En: Kumar H, Singh H (Eds.) A Textbook on Algae. Palgrave, London, Pp.141-160.
- Kwon K, Choi B-J, Kim K, et al. (2019) Tracing the Trajectory of Pelagic *Sargassum* Using Satellite Monitoring and Lagrangian Transport Simulations in the East China Sea and Yellow Sea. *Algae* 34, 315-326.
- Ladd H (1977). Types of Coral Reefs and Their Distribution. En: Jones O, Endean R. (Ed.) Biology and Geology of Coral Reefs V4: Geology 2. Academic Press. Elsevier.
- Laffoley D, Roe H, Angel M, et al. (2011) The Protection and Management of the Sargasso Sea: the Golden Floating Rainforest of the Atlantic Ocean. Summary Science and Supporting Evidence Case. *Sargasso Sea Alliance* 44 Pp.
- Lapointe B (1986) Phosphorus-Limited Photosynthesis and Growth of *Sargassum natans* and *Sargassum fluitans* (Phaeophyceae) In the Western North Atlantic. *Deep Sea Res* 33, 391-399.
- Lapointe B (1995) A Comparison of Nutrient-Limited Productivity in *Sargassum natans* from Neritic vs. Oceanic Waters of the Western North Atlantic Ocean. *Limnol Oceanogr* 40, 625-633.
- Lapointe B, West L, Sutton T, et al. (2014) Ryther Revisited: Nutrient Excretions by Fishes Enhance Productivity of Pelagic *Sargassum* in the Western North Atlantic Ocean. *J Exp Mar Biol Ecol* 458, 46-56.

- Lapointe B, Burkholder J, Van Alstyne K (2018) Harmful Macroalgal Blooms in a Changing World: Causes, Impacts, and Management. En: Shumway S, Burkholder J, Morton S (Eds.) Harmful Algal Blooms. John Wiley & Sons, Ltd.
- Lapointe B, Brewton R, Herren L, et al. (2021) Nutrient Content and Stoichiometry of Pelagic *Sargassum* Reflects Increasing Nitrogen Availability in the Atlantic Basin. *Nat Commun* 12, 3060.
- Lara-Hernández J (2012) Transporte Larvario y Conectividad Potencial de Corales Pétreos en el Pacífico Mexicano: Estudio Mediante Simulaciones Numéricas. Tesis de Licenciatura. Universidad del Mar, Oaxaca, México. <http://dx.doi.org/10.13140/rg.2.2.19550.92483>
- Lara-Hernández J, Zavala-Hidalgo J, Sanvicente-Añorve L, et al. (2019) Connectivity and Larval Dispersal Pathways of *Panulirus argus* in the Gulf of Mexico: A Numerical Study. *J Sea Res* 155, 101814.
- Leon C (2019) El Sargazo A Escena. *Salud Publica Mex* 61, 701-703.
- Leonelli F, Bellacicco M, Pitarch J, et al. (2022) Ultra-Oligotrophic Waters Expansion in the North Atlantic Subtropical Gyre Revealed by 21 Years of Satellite Observations. *Geophys Res Lett* 49, E2021gl096965.
- Lett C, Verley P, Mullon C, et al. (2008) A Lagrangian Tool for Modelling Ichthyoplankton Dynamics. *Environ Modell Soft* 23, 1210-1214.
- Liang (2018) 5.01 - Volume 5 Overview: Recent Progress in Remote Sensing of Earth's Energy Budget. En: Liang S (Ed.) Comprehensive Remote Sensing. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier.

- Lin J (2012) Lagrangian Modeling of the Atmosphere: An Introduction. En: Lin J, Brunner D, Gerbig C, et al. (Eds.) Lagrangian Modeling of the Atmosphere. *Geophys Monogr Ser.*
- Liu Y, Weisberg R, Vignudelli S, et al. (2014) Evaluation of Altimetry-Derived Surface Current Products Using Lagrangian Drifter Trajectories in the Eastern Gulf of Mexico. *J Geophys Res: Oceans* 119, 2827-2842.
- Liu J, Xia J, Zhuang M, et al. (2021) Golden Seaweed Tides Accumulated in Pyropia Aquaculture Areas Are Becoming a Normal Phenomenon in the Yellow Sea of China. *Sci Tot Environ* 774, 145726.
- López-Portillo J, Casasola-Rodríguez I, Escalante-Ramírez B, et al. (2022) *Sargassum* Detection and Path Estimation Using Neural Networks. En: Schelkens P, Kozacki T (Eds.) Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications VII [1213804]. Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering; Vol. 12138.
- Lowe R, Falter J, Monismith S, et al. (2009a) A Numerical Study of Circulation in a Coastal Reef-Lagoon System, *J Geophys Res* 114, C06022.
- Lowe R, Falter J, Monismith S, et al. (2009) Wave-Driven Circulation of a Coastal Reef-Lagoon System. *J Phys Oceanogr* 39, 873-893.
- Luckhurst B (2015) A Preliminary Food Web of the Pelagic Environment of the Sargasso Sea with a Focus on the Fish Species of Interest to ICCAT. *Collect Vol Sci Pap ICCAT* 71, 2913-2932.
- Magaña-Gallegos E, García-Sánchez M, Graham C, et al. (2023a) Growth Rates of Pelagic *Sargassum* Species in the Mexican Caribbean. *Aquat Bot* 185, 103614.

- Magaña-Gallegos E, Villegas-Muñoz E, Salas-Acosta E, et al. (2023b) The Effect of Temperature on the Growth of Holopelagic *Sargassum* Species. *Phycology* 3, 138-146.
- Mahowald N, Scanza R, Brahney J, et al. (2017) Aerosol Deposition Impacts on Land and Ocean Carbon Cycles. *Curr Clim Change Rep* 3,16-31.
- Mahowald N, Hamilton D, Mackey K, et al. (2018) Aerosol Trace Metal Leaching and Impacts on Marine Microorganisms. *Nat Commun* 9, 2614.
- Manikandan B, Padelkar A, Ravindran J, et al. (2021) Histopathological Investigation of the Reef Coral *Goniastrea* sp. Affected by Macroalgal Abrasion. *Mar Biol* 168, 44.
- Mann K, Chapman A, Gagné J (1980) Productivity of Seaweeds: the Potential and the Reality. En: Falkowski P (Ed.) Primary Productivity in the Sea. Environmental Science Research, Vol 19. Springer, Boston, MA.
- Marsh R, Addo K, Jayson-Quashigah PN, et al. (2021) Seasonal Predictions of Holopelagic *Sargassum* Across the Tropical Atlantic Accounting for Uncertainty in Drivers and Processes: the SARTRAC Ensemble Forecast System. *Front Mar Sci* 8, 722524.
- Marsh R, Oxenford H, Cox S-A, et al. (2022) Forecasting Seasonal *Sargassum* Events Across the Tropical Atlantic: Overview and Challenges. *Front Mar Sci* 9, 914501.
- Marsh R, Skliris N, Tompkins E, et al. (2023) Climate-*Sargassum* Interactions Across Scales in the Tropical Atlantic. *PLOS Clim* 2, E0000253.
- Martínez S, Carrillo L, Marinone S (2019) Potential Connectivity Between Marine Protected Areas in the Mesoamerican Reef for Two Species of Virtual Fish Larvae: *Lutjanus analis* and *Epinephelus striatus*. *Ecol Indic* 102, 10-20.

- Martínez-González G (2019) Sargazo: La Irrupción Atípica de un Ecosistema Milenario. *Salud Publica Mex* 61, 698-700.
- Mata-Lara M, Garza-Pérez J, Aranda-Fragoso A, et al. (2018) Social Alienation and Environmental Decline in a Coral Reef: Challenges to Coastal Management in the Mexican Caribbean. *Ocean Coast Manag* 155, 30-39.
- Mathews J, Fink K (1999) Numerical Methods Using Matlab. 3^a Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458. 662 pp.
- Mattio L, Payri C (2011) 190 Years of *Sargassum* Taxonomy, Facing the Advent of DNA Phylogenies. *Bot Rev* 77, 31-70.
- Mazéas L, Yonamine R, Barbeyron T, et al. (2023) Assembly and Synthesis of the Extracellular Matrix in Brown Algae. *Semin Cell Dev Biol* 134, 112-124.
- Mazumdar D, Guthrie R (1988) An Analysis of Numerical Methods for Solving the Particle Trajectory Equation. *Appl Math Model* 12, 398-402.
- Menzel D, Ryther J (1953) Nutrients Limiting the Production of Phytoplankton in the Sargasso Sea, with Special Reference to Iron. *Deep Sea Res* 7, 276-281.
- Milledge J, Harvey P (2016) Golden Tides: Problem Or Golden Opportunity? the Valorization of *Sargassum* from Beach Inundations. *J Mar Sci Eng* 4, 60.
- Mills M, Ridame C, Davey M, et al. (2004) Iron and Phosphorus Co-Limit Nitrogen Fixation in the Eastern Tropical North Atlantic. *Nature* 429, 292-294.

- Miret-Villaseñor D, Enriquez C, Mariño-Tapia I, et al. (2019) Interactions Between Nearshore and Shelf Dynamics Under Hurricane Conditions: Implications for Exposed and Reef Protected Beaches. *J Coast Res* 92, 55-67.
- Miron P, Olascoaga M, Beron-Vera F, et al. (2020) Clustering of Marine-Debris- and *Sargassum*-Like Drifters Explained by Inertial Particle Dynamics. *Geophys Res Lett* 47, e2020GL089874.
- Moberg F, Folke C (1999) Ecological Goods and Services of Coral Reef Ecosystems. *Ecol Econ* 29, 215-233.
- Molina-Hernández A, Garza-Pérez J, Aranda-Fragoso A (2018) Identifying Management Challenges and Implementation Shortcomings of a New Fishing Refuge: Akumal Reef, Mexico. *Ocean Coast Manag* 161, 127-140.
- Monroy-Velázquez L, Rodríguez-Martínez R, Van Tussenbroek B, et al. (2019) Motile Macrofauna Associated with Pelagic *Sargassum* in a Mexican Reef Lagoon. *J Environ Manag* 252, 109650.
- Moore J, Braucher O (2007) Observations of Dissolved Iron Concentrations in the World Ocean: Implications and Constraints for Ocean Biogeochemical Models. *Biogeosciences Discuss* 4, 1241-1277.
- Moore C, Mills M, Berman-Frank I, et al. (2013) Processes and Patterns of Oceanic Nutrient Limitation. *Nat Geosci*, 6, 701-710.
- Moser M, Lee D (2012) Foraging Over *Sargassum* by Western North Atlantic Seabirds. *Wilson J Ornithol* 124, 66-72.

- Nadeem F, Hanif M, Majeed M, et al. (2018) Role of Macronutrients and Micronutrients in the Growth and Development of Plants and Prevention of Deleterious Plant Diseases – A Comprehensive Review. *Int J Chem Biochem* 13, 31-52.
- Nava-Jiménez I, Tejeda-Vega S, Cortina-Ramírez G, et al. (2022) Macro and Microelement Analysis of *Sargassum fluitans* and *Sargassum natans* Arriving in the Coastal Zone of Cancun, Quintana Roo, Mexico. *Rev Biol Mar Oceanogr* 57, 26-33.
- Nelson N, Ben-Shem A (2004) The Complex Architecture of Oxygenic Photosynthesis. *Nat Rev Mol Cell Biol* 5, 971-982.
- Null K, Knee K, Crook E, et al. (2014) Composition and Fluxes of Submarine Groundwater Along the Caribbean Coast of the Yucatan Peninsula. *Cont Shelf Res* 77, 38-50.
- Ody A, Thibaut T, Berline L, et al. (2019) from in Situ to Satellite Observations of Pelagic *Sargassum* Distribution and Aggregation in the Tropical North Atlantic Ocean. *Plos ONE* 14, E0222584.
- Olguin-Maciel E, Leal-Bautista R, Alzate-Gaviria L, et al. (2022) Environmental Impact of *Sargassum* spp. Landings: An Evaluation of Leachate Released from Natural Decomposition at Mexican Caribbean Coast. *Environ Sci Pollut Res* 29, 91071-91080.
- Olgun N, Duggen S, Croot P, et al. (2011) Surface Ocean Iron Fertilization: the Role of Airborne Volcanic Ash from Subduction Zone and Hot Spot Volcanoes and Related Iron Fluxes into the Pacific Ocean. *Glob Biogeochem Cycles* 25, GB4001.
- Ortega-Flores P, Serviere-Zaragoza E, Anda-Montañez J, et al. (2022) Trace Elements in Pelagic *Sargassum* Species in the Mexican Caribbean: Identification of Key Variables Affecting Arsenic Accumulation in *S. fluitans*. *Sci Tot Environ* 806, 150657.

- Ortega-Flores P, Gobert T, Méndez-Rodríguez L, et al. (2023) Inorganic Arsenic in Holopelagic *Sargassum* spp. Stranded in the Mexican Caribbean: Seasonal Variations and Comparison with International Regulations and Guidelines. *Aquat Bot* 188, 103674.
- Ortegón-Aznar I, Ávila-Mosqueda V (2020) Arribazón de Sargazo en la Península de Yucatán: ¿Problema Local, Regional o Mundial? *Bioagrobiencias* 13, 28-37.
- Ortiz-Royero J, Otero L, Restrepo J, et al. (2013) Cold Fronts in the Colombian Caribbean Sea and Their Relationship to Extreme Wave Events. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13, 2797-2804.
- Ouillon S, Douillet P, Lefebvre J, et al. (2010) Circulation and Suspended Sediment Transport in a Coral Reef Lagoon: the South-West Lagoon of New Caledonia. *Mar Pollut Bull* 61, 7-12.
- Oviatt C, Huizenga K, Rogers C, et al. (2019) What Nutrient Sources Support Anomalous Growth and the Recent *Sargassum* Mass Stranding on Caribbean Beaches? A Review. *Mar Pollut Bull* 145, 517-525.
- Oxenford H, Cox S, Van Tussenbroek B, et al. (2021) Challenges of Turning the *Sargassum* Crisis into Gold: Current Constraints and Implications for the Caribbean. *Phycology* 1, 27-48.
- Palter J (2015) Storms Bring Ocean Nutrients to Light. *Nature* 525, 460-461.
- Parr A (1939) Quantitative Observations on the Pelagic *Sargassum* Vegetation of the Western North Atlantic. with Preliminary Discussion of Morphology and Relationships. *Bull Bingham Oceanogr Collect* 6, 7.
- Parra S, Mariño-Tapia I, Enriquez C, et al. (2014) Variations in Turbulent Kinetic Energy at a Point Source Submarine Groundwater Discharge in a Reef Lagoon. *Ocean Dynam* 64, 1601-1614.

- Parra S, Valle-Levinson A, Mariño-Tapia I, et al. (2015) Salt Intrusion at a Submarine Spring in a Fringing Reef Lagoon. *J Geophys Res: Oceans* 120, 2736-2750.
- Parra S, Valle-Levinson A, Mariño-Tapia I, et al. (2016) Seasonal Variability of Saltwater Intrusion at a Point-Source Submarine Groundwater Discharge. *Limnol Oceanogr* 61, 1245-1258.
- Pendleton L, Krowicki F, Strosser P, et al. (2014) Assessing the Economic Contribution of Marine and Coastal Ecosystem Services in the Sargasso Sea. NI R 14-05. Durham, NC: Duke University.
- Perdue E (2009) Natural Organic Matter. En: Likens G (Ed.) *Encyclopedia of Inland Waters. Academic Press*, Pp. 806-819.
- Pérez-Gómez JA, García-Mendoza E, Olivos-Ortiz A, et al. (2020) Indicators of Nutrient Enrichment in Coastal Ecosystems of the Northern Mexican Caribbean. *Ecol Indic* 118, 106756.
- Peter T, Lewontin R (2021) The Genotype/Phenotype Distinction. En: Zalta E (Ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Pianosi F, Beven K, Freer J, et al. (2016) Sensitivity Analysis of Environmental Models: A Systematic Review with Practical Workflow. *Environ Model Soft* 79, 214-232.
- Pigliucci M, Murren C, Schlichting C (2006) Phenotypic Plasticity and Evolution by Genetic Assimilation. *J Exp Biol* 209, 2362-2367.
- Podlejski W, Berline L, Nerini D, et al. (2023) A New *Sargassum* Drift Model Derived from Features Tracking in MODIS Images. *Mar Pollut Bull* 188, 114629.
- Pownuk A, Kreinovich V (2017) Why Linear Interpolation? *Math Struct Model* 3, 43-49.

- Putman N, Goni G, Gramer L (2018) Simulating Transport Pathways of Pelagic *Sargassum* from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Prog Oceanogr* 165, 205-214.
- Putman N, Triñanes J, Lumpkin R, et al. (2020) Improving Transport Predictions of Pelagic *Sargassum*. *J Exp Mar Biol Ecol* 529, 151398.
- Putman N, Hu C (2022) Sinking *Sargassum*. *Geophys Res Lett* 49, E2022g1100189.
- Rabalais N, Turner R, Díaz R, et al. (2009) Global Change and Eutrophication of Coastal Waters. *ICES J Mar Sci* 66, 1528-1537.
- Ramon J, Lledó L, Torralba V, et al. (2019) What Global Reanalysis Best Represents Near-Surface Winds? *Q J R Meteorol Soc* 145, 3236-3251.
- Rascio N, La Rocca N (2013) Biological Nitrogen Fixation. En: Fath B (Ed.) Encyclopedia of Ecology. 2^a Ed. Elsevier. 264-279.
- Reichholf J (1986) Is Saharan Dust a Major Source of Nutrients for the Amazonian Rain Forest? *Stud Neotrop Fauna Environ* 21, 251-255.
- Renner S (2004) Plant Dispersal Across the Tropical Atlantic by Wind and Sea Currents. *Int J Plant Sci* 165, S23–S33.
- Resiere D, Mehdaoui H, Florentin J, et al. (2021) *Sargassum* Seaweed Health Menace in the Caribbean: Clinical Characteristics of a Population Exposed to Hydrogen Sulfide During the 2018 Massive Stranding. *Clin Toxicol (Phila)* 59, 215-223.
- Restrepo J, Ortíz J, Pierini J, et al. (2014) Freshwater Discharge into the Caribbean Sea from the Rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, Variability and Recent Changes. *J Hydrol* 509, 266-281.

- Reyes-Mendoza O, Herrera-Silveira J, Mariño-Tapia I, et al. (2019) Phytoplankton Blooms Associated with Upwelling at Cabo Catoche. *Cont Shelf Res* 174, 118-131.
- Rioja-Nieto R, Álvarez-Filip L (2019) Coral Reef Systems of the Mexican Caribbean: Status, Recent Trends and Conservation. *Mar Pollut Bull* 140, 616-625.
- Rioja-Nieto R, Garza-Pérez R, Álvarez-Filip L, et al. (2019) Chapter 27 - The Mexican Caribbean: from Xcalak to Holbox. World Seas: An Environmental Evaluation. *Academic Press*, Pp. 637-653.
- River G, Edmunds P (2001) Mechanisms of Interaction Between Macroalgae and Scleractinians on a Coral Reef in Jamaica. *J Exp Mar Biol Ecol* 261, 159-172.
- Rizzolo J, Barbosa C, Borillo G, et al. (2017) Soluble Iron Nutrients in Saharan Dust Over the Central Amazon Rainforest. *Atmos Chem Phys* 17, 2673-2687.
- Robledo D, Vázquez-Delfín E, Freile-Pelegrin Y et al. (2021) Challenges and Opportunities in Relation to *Sargassum* Events Along the Caribbean Sea. *Front Mar Sci* 8, 699664.
- Rodríguez-Martínez R, Van Tussenbroek B, Jordán-Dahlgren E. (2016) Afluencia Masiva de Sargazo Pelágico a la Costa del Caribe Mexicano (2014–2015). En: García-Mendoza E, Quijano-Scheggia S, Olivos-Ortiz A, et al. (Eds.) Florecimientos Algales Nocivos en México. Ensenada, México. CICESE, Pp. 352-365.
- Rodríguez-Martínez R, Medina-Valmaseda A, Blanchon P, et al. (2019) Faunal Mortality Associated with Massive Beaching and Decomposition of Pelagic *Sargassum*. *Mar Pollut Bull* 146, 201-205.

- Rodríguez-Martínez R, Roy P, Torrescano-Valle N (2020) Element Concentrations in Pelagic *Sargassum* Along the Mexican Caribbean Coast in 2018-2019. *Peer J* 8, E8667.
- Rodríguez-Martínez R, Jordán-Dahlgren E, Hu C (2022) Spatio-Temporal Variability of Pelagic *Sargassum* Landings on the Northern Mexican Caribbean. *Remote Sens Appl: Soc Environ* 27, 100767.
- Rodríguez-Martínez R, Torres-Conde E, Jordán-Dahlgren E (2023) Pelagic *Sargassum* Cleanup Cost in Mexico. *Ocean Coast Manag* 237, 106542.
- Roig-Munar F, Olivo-Batista O, Del Toro-Piñero P, et al. (2022) Pérdida de Sedimento Asociada a la Retirada de Depósitos de *Sargassum* spp. en las Playas del Caribe. *Nemus* 12, 48-63.
- Rooker K, Turner J, Holt S (2006) Trophic Ecology of *Sargassum*-Associated Fishes in the Gulf of Mexico Determined from Stable Isotopes and Fatty Acids. *Mar Ecol Prog Ser* 313, 249-259.
- Rosado-Espinosa L, Freile-Peigrín Y, Hernández-Nuñez E, et al. (2020) A Comparative Study of *Sargassum* Species from the Yucatan Peninsula Coast: Morphological and Chemical Characterization. *Phycologia* 59, 261-271.
- Rumyantseva A, Lucas N, Rippet T, et al. (2015) Ocean Nutrient Pathways Associated with the Passage of a Storm. *Glob Biogeochem Cycles* 29, 1179-1189.
- Rutten J, Arriaga J, Montoya L, et al. (2021) Beaching and Natural Removal Dynamics of Pelagic *Sargassum* in a Fringing-Reef Lagoon. *J Geophys Res: Oceans* 126, E2021jc017636.
- Saha S, Moorthi S, Wu X, et al. (2014) The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J Clim* 27, 2185-2208.

- Saldarriaga-Hernandez S, Nájera-Martínez E, Martínez-Prado M, et al. (2020) *Sargassum*-Based Potential Biosorbent to Tackle Pollution in Aqueous Ecosystems – An Overview. *Case Stud Chem Environ Eng* 2, 100032.
- Saldarriaga-Hernandez S, Hernández-Vargas G, Iqbal H, et al. (2020b) Bioremediation Potential of *Sargassum* sp. Biomass to Tackle Pollution in Coastal Ecosystems: Circular Economy Approach. *Sci Tot Environ* 715, 136978.
- Sanchez-Rubio G, Perry H, Franks J, et al. (2017) Occurrence of Pelagic *Sargassum* in Waters of the U.S. Gulf of Mexico in Response to Weather-Related Hydrographic Regimes Associated with Decadal and Interannual Variability in Global Climate. *Fish Bull* 116, 93-106.
- Schamberger L, Minghelli A, Chami M (2022) Quantification of Underwater *Sargassum* Aggregations Based on a Semi-Analytical Approach Applied to Sentinel-3/OLCI (Copernicus) Data in the Tropical Atlantic Ocean. *Remote Sens* 14, 5230.
- 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.
- Shah S, Heemink A, Gräwe U, et al. (2013) Adaptive Time Stepping Algorithm for Lagrangian Transport Models: Theory and Idealised Test Cases. *Ocean Model* 68, 9-21.
- Shanks A (2009) Pelagic Larval Duration and Dispersal Distance Revisited. *Biol Bull* 216, 373-385.
- Shapiro G (2004) A 2.5D Model for Sand Transport in a Shallow Sea: Effect of Ekman Veering. *Cont Shelf Res* 24, 659-671.

- Shapiro G, Van Der Molen J, De Swart H (2004) The Effect of Velocity Veering on Sand Transport in a Shallow Sea. *Ocean Dynam* 54, 415-423.
- Sharmar V, Markina M (2020) Validation of Global Wind Wave Hindcasts Using ERA5, MERRA2, ERA-Interim and Cfsrv2 Reanalyzes. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci* 606, 012056
- Sheinbaum J, Candela J, Badan A, et al. (2002) Flow Structure and Transport in the Yucatán Channel. *Geophys Res Lett* 29, 10-1-10-4.
- Siegel D, Kinlan B, Gaylord B, et al. (2003) Lagrangian Descriptions of Marine Larval Dispersion. *Mar Ecol Prog Ser* 260, 83-96.
- Sigman D, Hain M (2012) The Biological Productivity of the Ocean. *Nat Educ Knowl* 3(10), 21.
- Singh S, Yadav R, Sharma S, et al. (2023) Arsenic Contamination in the Food Chain: A Threat to Food Security and Human Health. *J Appl Biol Biotechnol* 11, 24-33.
- Skirris N, Marsh R, Addo K, et al. (2022) Physical Drivers of Pelagic *Sargassum* Bloom Interannual Variability in the Central West Atlantic Over 2010–2020. *Ocean Dynam* 72, 383-404.
- Smetacek V, Zingone A (2013) Green and Golden Seaweed Tides on the Rise. *Nature* 504, 84-88.
- Smith S, Swaney D, Talaue-Mcmanus L, et al. (2003) Humans, Hydrology, and the Distribution of Inorganic Nutrient Loading to the Ocean. *Bioscience* 53, 235-245.
- Snider S, Brimlow J (2013) An Introduction to Population Growth. *Nat Educ Knowl* 4, 3.
- Soeder D (2021) Fossil Fuels and Climate Change. En: Soeder D (Ed.) Fracking and the Environment. Springer, Cham.

- Solarin B, Bolaji D, Fakayode O, et al. (2014) Impacts of an Invasive Seaweed *Sargassum hystrix* var. *fluitans* (Borgesen 1914) On the Fisheries and Other Economic Implications for the Nigerian Coastal Waters. *IOSR J Agric Vet Sci* 7, 1-6.
- Sosa-Gutierrez R, Jouanno J, Berline L, et al. (2022) Impact of Tropical Cyclones on Pelagic *Sargassum*. *Geophys Res Lett* 49, E2021gl097484.
- Stiger-Pouvreau V, Mattio L, De Ramon A, et al. (2023) A Concise Review of the Highly Diverse Genus *Sargassum* C. Agardh with Wide Industrial Potential. *J Appl Phycol* 35, 1453-1483.
- Stohl A, Wotawa G, Seibert P, et al. (1995) Interpolation Errors in Wind Fields as a Function of Spatial and Temporal Resolution and Their Impact on Different Types of Kinematic Trajectory. *J Appl Meteorol Climatol* 34, 2149-2165.
- Stoner A (1983) Pelagic *Sargassum*: Evidence for a Major Decrease in Biomass. *Deep-Sea Res A* 30, 469-474.
- Sulistiyani Y, Afiati N, Haeruddin, et al. (2022) Molecular Identification of the Brown Algae *Sargassum* sp. from the Lombok Coastal Waters. *J Kelaut Trop* 25, 291-298.
- Theirlynck T, Mendoca I, Engelen A, et al. (2023) Diversity of the Holopelagic *Sargassum* Microbiome from the Great Atlantic *Sargassum* Belt to Coastal Stranding Locations. *Harmful Algae* 122, 102360.
- Thomas L, Tólle L, Ziegenhagen B, et al. (2012) Are Vegetative Reproduction Capacities the Cause of Widespread Invasion of *Eurasian salicaceae* in Patagonian River Landscapes? *Plos ONE* 7, E50652.

- Tiébré M-S, Vanderhoeven S, Saad L, et al. (2007) Hybridization and Sexual Reproduction in the Invasive Alien *Fallopia* (Polygonaceae) Complex in Belgium. *Ann Bot* 99, 193-203.
- Tong X, Jong M-C, Zhang J, et al. (2021) Modelling the Spatial and Seasonal Distribution, Fate and Transport of Floating Plastics in Tropical Coastal Waters. *J Hazard Mater* 414, 125502.
- Torres M, Hashemi M, Hayward S et al. (2018) Role of Hurricane Wind Models in Accurate Simulation of Storm Surge and Waves. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 145, 04018039.
- Trinanes J, Putman N, Goni G, et al. (2021a) Monitoring Pelagic *Sargassum* Inundation Potential for Coastal Communities. *J Oper Oceanogr* 16, 48-59.
- Trinanes J, Hu C, Putman N, et al. (2021b) An Integrated Observing Effort for *Sargassum* Monitoring and Warning in the Caribbean Sea, Tropical Atlantic, and Gulf of Mexico. En: Kappel E, Juniper S, Seeyave S, et al. (Eds.) *Frontiers in Ocean Observing: Documenting Ecosystems, Understanding Environmental Changes, Forecasting Hazards. Oceanography* 34, 68-69.
- Tsukidate J (1984) Studies on the Regenerative Ability of the Brown Algae, *Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt and *Sargassum tortile* C. Agardh. *Hydrobiologia* 116-117, 393-397.
- Tyrrell T (2001) Redfield Ratio. En: Steele J (Ed.) *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press. 2377-2387.
- Uribe-Martínez A, Berriel-Bueno D, Chávez V, et al. (2022) Multiscale Distribution Patterns of Pelagic Rafts of Sargasso (*Sargassum* spp.) In the Mexican Caribbean (2014–2020). *Front Mar Sci* 9, 920339.

- van Sebille E, Griffies S, Abernathey R, et al. (2018) Lagrangian Ocean Analysis: Fundamentals and Practices. *Ocean Modell* 121, 49-75.
- van Tussenbroek B, Hernández H, Rodríguez-Martínez R, et al. (2017) Severe Impacts of Brown Tides Caused by *Sargassum* spp. on Near-Shore Caribbean Seagrass Communities. *Mar Pollut Bull* 122, 272-281.
- Vega T, Burkepile D, Correa A, et al. (2012) Macroalgae Decrease Growth and Alter Microbial Community Structure of the Reef-Building Coral, *Porites astreoides*. *PLOS ONE*. 7, E44246.
- Velázquez-Ochoa R, Enríquez S. (2023) Environmental Degradation of the Mexican Caribbean Reef Lagoons. *Mar Pollut Bull* 191, 114947.
- Beron-Vera F, Miron P (2020) A Minimal Maxey–Riley Model for the Drift of *Sargassum* Rafts. *J Fluid Mech*, 904, A8.
- Beron-Vera F (2021) Nonlinear Dynamics of Inertial Particles in the Ocean: From Drifters and Floats to Marine Debris and *Sargassum*. *Nonlinear Dyn* 103, 1-26.
- Wang M, Hu C, Cannizzaro J, et al. (2018) Remote Sensing of *Sargassum* Biomass, Nutrients, and Pigments. *Geophys Res Lett* 45, 12359-12367.
- Wang M, Hu C, Barnes BB, et al. (2019) The Great Atlantic *Sargassum* Belt. *Science* 365, 83-87.
- Wang W-L, Moore J, Martiny A, et al. (2019b) Convergent Estimates of Marine Nitrogen Fixation. *Nature* 566, 205-211.
- Wang H, Wang G, Gu W (2020) Macroalgal Blooms Caused by Marine Nutrient Changes Resulting from Human Activities. *J Appl Ecol* 57, 766-776.

- Wang M, Hu C (2021) Satellite Remote Sensing of Pelagic *Sargassum* Macroalgae: the Power of High Resolution and Deep Learning. *Remote Sens Environ* 264, 112631.
- Watanabe F, Alcântara E, Rodrigues T, et al. (2015) Estimation of Chlorophyll-A Concentration and the Trophic State of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir Using OLI/Landsat-8 Images. *Int J Environ Res Public Health* 12, 10391-10417.
- Webster R, Linton T (2013) Development and Implementation of *Sargassum* Early Advisory System (SEAS). *Shore & Beach* 81, 1-6.
- Webster R, Dellepenna T, Taylor A, et al. (2015) A Quantitative Investigation of the Role *Sargassum* Accumulation Plays in Inhibiting Sand Erosion on Galveston Island's West-End Beaches. *Sargassum* Early Advisory System.
- Winant C (1980) Coastal Circulation and Wind-Induced Currents. *Ann Rev Fluid Mech* 12, 271-301.
- Witherington B, Hiram S, Hardy R (2012) Young Sea Turtles of the Pelagic *Sargassum*-Dominated Drift Community: Habitat Use, Population Density, and Threats. *Mar Ecol Prog Ser* 463: 1-22.
- Woodcock A (1950) Subsurface Pelagic *Sargassum*. *J Mar Res* 722, 77-91.
- Woodcock A (1993) Winds Subsurface Pelagic *Sargassum* and Langmuir Circulations. *J Exp Mar Biol Ecol* 170, 117-125.
- Wu J, Boyle E (2002) Iron in the Sargasso Sea: Implications for the Processes Controlling Dissolved Fe Distribution in the Ocean. *Glob Biogeochem Cycles* 16, 33-1-33-8.

- Wu J, Keller D, Oschlies A (2022) Carbon Dioxide Removal Via Macroalgae Open-Ocean Mariculture and Sinking: an Earth System Modeling Study. *Dynam Discuss* [Preprint].
- Xiao J, Wang Z, Song H, et al. (2020) An Anomalous Bi-Macroalgal Bloom Caused by *Ulva* and *Sargassum* Seaweeds During Spring to Summer of 2017 in the Western Yellow Sea, China. *Harmful Algae* 93, 101760.
- Xue B, Leibler S (2018) Benefits of Phenotypic Plasticity for Population Growth in Varying Environments. *PNAS* 115, 12745-12750.
- Yap-Dejeto L, Fabillo M, Sison-Mangus M (2022) Biodiversity of *Sargassum* (Fucales, Sargassaceae) from Eastern Samar (Philippines) Inferred from Nuclear Ribosomal Internal Transcribed Spacer (ITS) Sequence Data. *Appl Phycol* 3, 422-434.
- Yap H (2013) Coral Reef Ecosystems. En: Orcutt J (Ed.) *Earth System Monitoring*. Springer, New York.
- Yokoi K, Konomi A (2012) Toxicity of so-Called Edible Hijiki Seaweed (*Sargassum fusiforme*) Containing Inorganic Arsenic. *Regul Toxicol Pharmacol* 63, 291-297.
- Zhang J, Ding X, Zhuang M, et al. (2019) An Increase in New *Sargassum* (Phaeophyceae) Blooms Along the Coast of the East China Sea and Yellow Sea. *Phycologia* 58, 374-381.