

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está 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 o titular de los Derechos de Autor.

CICESE © 2025, Todos los Derechos Reservados, CICESE

# Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



---

## Maestría en Ciencias en Oceanografía Física

---

### Estudio numérico de la distribución del sargazo en el Caribe mexicano a distintas resoluciones

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestra en Ciencias

Presenta:

**Ana Lucía de Santos Medina**

Ensenada, Baja California, México

2025

Tesis defendida por

**Ana Lucía de Santos Medina**

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Sheila Natalí Estrada Allis

Codirectora de tesis

Dra. Lorena Guerrero Moreno

Codirectora de tesis

Dra. Paulina Cetina Heredia

Dr. Julio Sheinbaum Pardo

Dr. Ernesto García Mendoza



Dra. María Tereza Cavazos Pérez  
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Ana Denise Re Araujo  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Ana Lucía de Santos Medina como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Oceanografía Física.

### **Estudio numérico de la distribución del sargazo en el Caribe mexicano a distintas resoluciones**

Resumen aprobado por:

Dra. Sheila Natalí Estrada Allis

Codirectora de tesis

Dra. Lorena Guerrero Moreno

Codirectora de tesis

Con el objetivo de contribuir al desarrollo de sistemas de pronóstico de arribazones de sargazo, se realizó un estudio numérico para evaluar su distribución en el Caribe mexicano utilizando campos de corrientes con resoluciones espaciales de 5 y 1 km. Los campos de corrientes fueron obtenidos mediante el modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS), mientras que la simulación del sargazo se llevó a cabo a través de la advección de partículas lagrangianas con el modelo OpenDrift. Se analizaron cuatro casos, cada uno con una duración de diez días, y se compararon las trayectorias resultantes con el fin de determinar la resolución espacial necesaria para desarrollar modelos de pronóstico eficientes de arribazones de sargazo. Se consideró que el sargazo era advechado por la velocidad de la corriente oceánica superficial, más un término de arrastre definido por la velocidad del viento en superficie multiplicada por un factor. En este trabajo, únicamente se analizó el efecto de variar la resolución espacial de las corrientes oceánicas. Los resultados mostraron que las partículas virtuales fueron transportadas principalmente por las corrientes de Caimán y Yucatán, además de remolinos de mesoescala localizados al sur de Cuba. La mayor diferencia entre ambas resoluciones espaciales se observó durante un evento extremo, caracterizado por el paso de un huracán sobre la zona de estudio. Se identificaron las zonas alrededor de Xcalak y Banco Chinchorro como propensas a varamientos, además de las previamente reportadas cerca de Cozumel y Tulum. Asimismo, se estableció una relación entre la dinámica de las corrientes oceánicas del área de estudio y los sitios de varamiento observados. Se concluye que la implementación de modelos de pronóstico con una resolución espacial de 5 km es suficiente para recrear la dinámica oceánica del área de estudio, ya que está dominada por estructuras de mesoescala. Sin embargo, se destaca la importancia de emplear modelos de mayor resolución durante eventos extremos y en regiones cercanas a las costas.

**Palabras clave: Sargazo, Caribe mexicano, modelos numéricos, resolución espacial**

Abstract of the thesis presented by Ana Lucía de Santos Medina as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

### **Numerical study of sargassum distribution in the mexican Caribbean at different resolutions**

Abstract approved by:

Dra. Sheila Natalí Estrada Allis

Thesis Co-Director

Dra. Lorena Guerrero Moreno

Thesis Co-Director

In order to contribute to the development of sargassum landing forecasting systems, a numerical study was conducted to evaluate its distribution in the Mexican Caribbean using current fields with spatial resolutions of 5 and 1 km. The current fields were obtained using the Regional Ocean Modeling System (ROMS), while the simulation of sargassum was performed through the advection of Lagrangian particles with the OpenDrift model. Four scenarios were analyzed, each lasting ten days, and the resulting trajectories were compared to determine the spatial scale required for developing accurate sargassum landing forecasting models. The sargassum was considered to be advected by the velocity of the surface ocean current, plus a drag term defined by the surface wind velocity multiplied by a factor. In this study, only the effect of varying the spatial resolution of ocean currents was analyzed. The results showed that the virtual particles were mainly transported by the Cayman and Yucatán currents, as well as mesoscale eddies located south of Cuba. The greatest difference between the two spatial resolutions was observed during an extreme event characterized by the passage of a hurricane over the study area. The regions around Xcalak and Banco Chinchorro were identified as prone to strandings, in addition to previously reported areas near Cozumel and Tulum. Furthermore, a relationship was established between the dynamics of ocean currents in the study area and the observed stranding sites. It is concluded that implementing forecasting models with a spatial resolution of 5 km is sufficient to reproduce the ocean dynamics of the study area, as it is dominated by mesoscale structures. However, the importance of using higher-resolution models during extreme events and in coastal areas is highlighted.

**Keywords: Sargassum, mexican Caribbean, numerical models, spatial resolution**

# Dedicatoria

**A mi Tita.**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por permitirme realizar un posgrado.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por brindarme el apoyo económico necesario para dedicarme de tiempo completo a la maestría.

Al Departamento de Oceanografía Física del CICESE por su apoyo en mi formación académica.

A mis directoras de tesis, Sheila Estrada y Lorena Guerrero, por su mentoría durante la elaboración de esta tesis.

A mis sinodales, por su apoyo y guía.

A los estudiantes, técnicos e investigadores que me ayudaron durante la maestría.

A mi familia, especialmente a mi mamá y a mis hermanas.

A todas las personas que amo.

A todas las personas que amé y ya no están.

# Tabla de contenido

	Página
Resumen en español .....	ii
Resumen en inglés .....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Lista de figuras .....	viii
Lista de tablas .....	xiii
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1. Antecedentes .....	3
1.1.1. Zona de estudio .....	3
1.1.1.1. Circulación en el Caribe .....	4
1.1.1.2. Vientos en el Caribe .....	6
1.1.2. Sargazo .....	7
1.1.2.1. Estudio del sargazo con aproximaciones Lagrangianas .....	9
1.1.2.2. Papel del viento en el transporte del sargazo .....	10
1.2. Justificación .....	11
1.3. Objetivos .....	12
1.3.1. Objetivo general .....	12
1.3.2. Objetivos específicos .....	12
<b>Capítulo 2. Metodología</b>	
2.1. Modelos numéricos .....	13
2.2. Datos observacionales .....	16
<b>Capítulo 3. Resultados</b>	
3.1. Validación del modelo ROMS .....	20
3.1.1. Flotadores del programa ARGO .....	20
3.1.2. Altura del nivel del mar y temperatura superficial .....	21
3.1.3. Programa Global de Derivadores de la NOAA .....	24
3.2. Casos de estudio .....	29
3.3. Configuración de las simulaciones .....	36
3.4. Porcentaje de trayectorias y tiempo de viaje .....	37
3.5. Porcentajes de partículas varadas y activas .....	41
3.6. Tiempos de arribo .....	44
<b>Capítulo 4. Discusión</b>	
4.1. Diferencias en el porcentaje de trayectorias y tiempo de viaje .....	48
4.2. Diferencias en el porcentaje de partículas varadas y tiempo de arribo .....	49
4.3. Consideraciones finales .....	50

**Capítulo 5. Conclusiones**

<b>Literatura citada</b> .....	52
<b>Anexos</b> .....	62

# Lista de figuras

Figura	Página
1. Fotografías de las especies pelágicas del sargazo (tomado de Schell et al. 2015). . . . .	1
2. Mapa de los límites territoriales, islas y mares de México. El sombreado azul indica su Zona Económica Exclusiva, siendo la porción localizada en el mar Caribe la correspondiente al Caribe mexicano (tomado de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2021). . . . .	2
3. Regímenes dinámicos y parámetros adimensionales (número de Rossby ( $Ro$ ), número de Froude ( $Fr$ ) y número de Reynolds ( $Re$ )) en función de las escalas horizontales típicas (modificado de Taylor & Thompson 2023). . . . .	2
4. Mapa de la batimetría de la zona de estudio, con la ubicación y nombre de los sitios relevantes para este trabajo. . . . .	3
5. Mapa de la batimetría del área de estudio con el esquema de las principales corrientes: corriente de Caimán (CC), corriente de Yucatán (CY), contracorriente Cubana (CCC) y giro de Honduras (GH). . . . .	5
6. Esquema de los patrones principales de corrientes oceánicas y localización del Mar de los Sargazos y del Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GCSA; modificado de Uribe-Martínez et al. 2022). . . . .	8
7. Ejemplo de Putman et al. 2020, los cuales utilizaron un enfoque Lagrangiano para analizar el sargazo. Las curvas verdes representan las trayectorias de derivadores diseñados para asemejarse a las matas de sargazo, las amarillas corresponden a las trayectorias de matas de sargazo rastreadas mediante GPS, las azul oscuro representan trayectorias de derivadores con lastre, y las azul claro muestran las trayectorias de derivadores sin lastre. . . . .	9
8. Fotografías de remoción del sargazo en el Caribe mexicano en: (a-c) la playa y (d) aguas costeras. (e) Recuperación de arena (una gran cantidad de arena es removida durante las actividades de limpieza del sargazo en las playas). (f) Albercas de lixiviados producidas por una gran acumulación de sargazo varado en la playa (tomado de Chávez et al. 2020). . . . .	12
9. Mapas de la batimetría de la zona de estudio donde (a) es el dominio numérico de la malla madre con resolución espacial de 5 km. El recuadro rojo denota el dominio numérico del anidado de la malla hija mostrado en (b) con resolución espacial de 1 km. . . . .	15
10. (a) Ubicación de las inmersiones de las flotas de ARGOS. Los puntos magentas corresponden a los perfiles de la plataforma 4901716 y los azules a la 4903354. (b) Trayectoria de las boyas del Programa Global de Derivadores de la NOAA. Las curvas naranjas indican las boyas con lastre y las verdes sin lastre. . . . .	17
11. Diagrama de los componentes principales de un derivador superficial del Programa Global de Derivadores de la NOAA (modificado de National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024). . . . .	18
12. (a) Comparación de perfiles de temperatura de las simulaciones y los perfiladores ARGO. (b) RMSE de los perfiles de temperatura en ambas mallas. (c) BIAS de los perfiles de temperatura en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una temperatura mayor (menor) que las observaciones. . . . .	20

13. (a) Comparación de perfiles de salinidad de las simulaciones y los perfiladores ARGO. (b) RMSE de los perfiles de salinidad en ambas mallas. (c) BIAS de los perfiles de salinidad en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una salinidad mayor (menor) que las observaciones. . . . . 21
14. (a) Comparación de series temporales de altura del nivel del mar (SSH) en la zona de estudio. Las curvas negra, roja y azul corresponden a las observaciones satelitales, malla madre y malla hija, respectivamente. (b) RMSE de las series temporales de SSH en ambas mallas. (c) BIAS de las series temporales de SSH en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SSH mayor (menor) que las observaciones. . . . . 22
15. (a) Comparación de series temporales de temperatura superficial del mar (SST) en la zona de estudio. Las curvas negra, roja y azul corresponden a las observaciones satelitales, malla madre y malla hija, respectivamente. (b) RMSE de las series temporales de SST en ambas mallas. (c) BIAS de las series temporales de SST en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SST mayor (menor) que las observaciones. . . . . 23
16. Promedios temporales (del 1 de agosto del 2022 al 27 de julio de 2023) de RMSE de la altura del nivel del mar de (a) malla madre y (b) malla hija y BIAS de la altura del nivel del mar de (c) malla madre y (d) malla hija. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SSH mayor (menor) que las observaciones. . . . . 23
17. Promedios temporales (del 1 de agosto del 2022 al 27 de julio de 2023) de RMSE de la temperatura superficial del mar de (a) malla madre y (b) malla hija y BIAS de la temperatura superficial del mar de (c) malla madre y (d) malla hija. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SST mayor (menor) que las observaciones. . . . . 24
18. Trayectorias de las partículas virtuales y las boyas con lastre (a, b) y sin lastre (c, d, e, f). Las curvas negras indican la trayectoria de las boyas, mientras que las rojas y azules las de las partículas virtuales de las mallas madre e hija, respectivamente. Las partículas se sembraron en la superficie cada 24 horas a lo largo de las trayectorias observadas de las boyas, permitiendo que evolucionaran durante 24 horas. A cada una de las partículas se le asignó un factor de arrastre del viento entre 0 y 5 %, con incrementos de 0.5 % (11 partículas en total para cada malla). . . . . 26
19. Trayectorias de las partículas virtuales y la boya sin lastre en el periodo del 31 de octubre al 15 de noviembre del 2022 forzadas con vientos de GFS (a) y ERA5 (b). Las partículas se sembraron en la superficie cada 24 horas a lo largo de las trayectorias observadas de las boyas, permitiendo que evolucionaran durante 24 horas. A cada una de las partículas se le asignó un factor de arrastre del viento entre 0 y 5 %, con incrementos de 0.5 % (11 partículas en total para cada malla). . . . . 27

Figura	Página
20. Campos de viento de ERA5 (a, b, c) y GFS (d, e, f) durante el paso del huracán Lisa sobre el área de estudio. En el caso de ERA5 el ciclón ingresa al dominio el 2 de noviembre en una latitud alrededor de los 16.5°N (b). Por otro lado, los campos de GFS muestran su ingreso desde el 1 de noviembre a una latitud de aproximadamente 18°N (d). . . . .	28
21. Medidor de desempeño de Liu-Weisberg ( $ss$ ) en función del factor de arrastre de viento para las (a) boyas sin lastre, (b) boyas con lastre y (c) todas las boyas. Las curvas rojas y azules representan los valores de $ss$ de las mallas madre e hija, respectivamente. Las líneas punteadas indican el factor de arrastre del viento en el que se alcanzó el valor máximo de $ss$ , en rosa para la malla madre y azul para la hija. . . . .	28
22. Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 7 (a/e), 10 (b/f), 13 (c/g) y 16 (d/h) de agosto de 2022. . . . .	30
23. Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso “Promedio” (7 al 17 de agosto de 2022). . . . .	31
24. Series temporales del valor absoluto del número de Rossby ( $ \zeta/f $ ) de las mallas madre (rojo) e hija (azul). La franja verde indica el periodo del caso “Rossby”. . . . .	31
25. Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 30 de marzo (a/e), 2 (b/f), 5 (c/g) y 8 (d/h) de abril de 2023. . . . .	32
26. Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso “Rossby” (30 de marzo al 9 de abril de 2023). . . . .	33
27. Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 10 (a/e), 13 (b/f), 16 (c/g) y 19 (d/h) de junio de 2023. . . . .	34
28. Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso “Anticiclón” (10 al 20 de junio de 2023). . . . .	34
29. Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 1 (a/e), 4 (b/f), 7 (c/g) y 11 (d/h) de noviembre de 2022. . . . .	35
30. Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso “Huracán” (1 al 11 de noviembre de 2022). . . . .	36
31. Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Promedio”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Promedio”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de 1/4°. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. . . . .	37

32. Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Rossby”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Rossby”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de  $1/4^\circ$ . Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. . . . . 38
33. Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Anticiclón”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Anticiclón”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de  $1/4^\circ$ . Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. . . . . 39
34. Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Huracán”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Huracán”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de  $1/4^\circ$ . Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. . . . . 40
35. Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso “Rossby” en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última grafica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . 41
36. Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso “Promedio” en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última grafica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . . 42
37. Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso “Anticiclón” en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última grafica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . . 43

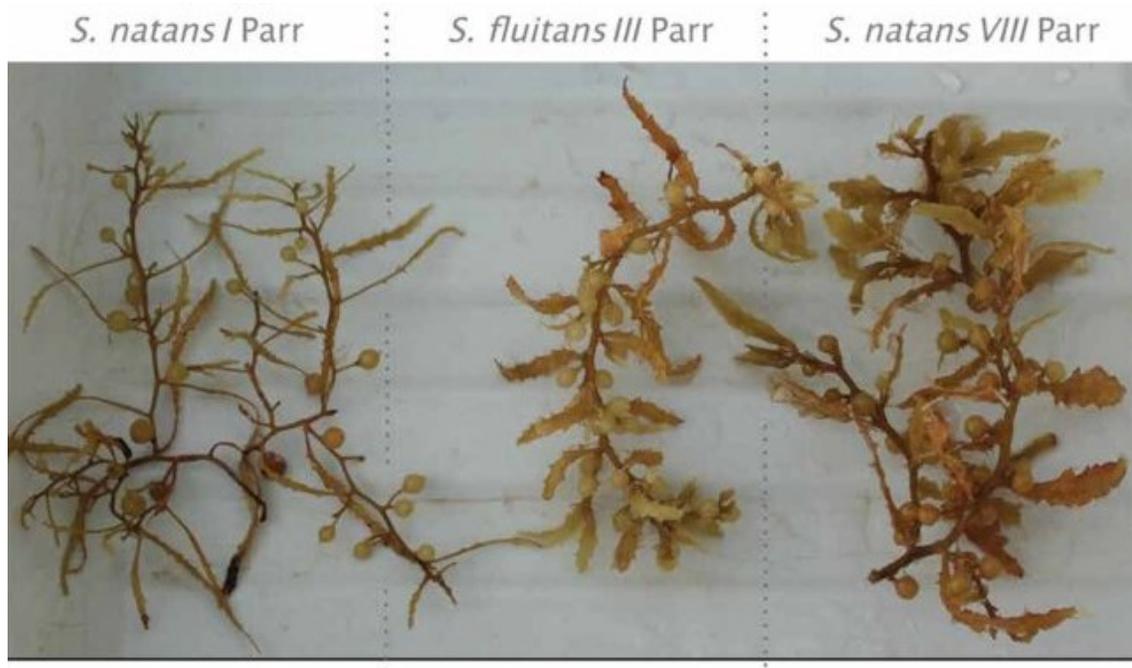
38. Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso “Huracán” en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . . 44
39. Día de arribo promedio para el caso “Promedio” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . . 45
40. Día de arribo promedio para el caso “Rossby” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . . 46
41. Día de arribo promedio para el caso “Anticiclón” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . . 46
42. Día de arribo promedio para el caso “Huracán” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija). . . . . 47

# Lista de tablas

Tabla	Página
1. Especificaciones de las configuraciones de ROMS. . . . .	16
2. Características principales de los casos de estudio. . . . .	30
3. Información de las flotas ARGO. . . . .	62
4. Información de las boyas de deriva del programa global de derivadores de la NOAA.	63

## Capítulo 1. Introducción

El sargazo es un género de macroalgas de color parduzco (Figura 1) que cuenta con dos especies pelágicas, *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*. Éstas se agrupan en conglomerados que funcionan como hábitat, refugio y sitios de alimentación y desove para ciertas especies (Butler et al., 1983; Lapointe, 1986; Coston-Clements et al., 1991; South Atlantic Fishery Management Council, 2002; Rooker et al., 2006; d'A. Laffoley et al., 2011; Witherington et al., 2012; Moser & Lee, 2012; Dreckmann & Sentías, 2013; Lapointe et al., 2014; Doyle & Franks, 2015). A partir del 2011, se detectaron grandes concentraciones de sargazo en el Atlántico tropical, formando una franja denominada el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GCSA; Franks et al., 2011, 2016; Gower et al., 2013; Dreckmann & Sentías, 2013; Wang et al., 2019). A finales del 2014, el GCSA se extendió por primera vez hasta el mar Caribe, ingresando al golfo de México (Maurer et al., 2015; Schell et al., 2015; Cuevas et al., 2018; Wang et al., 2019). Desde entonces los arribos de sargazo a las costas del Caribe mexicano se han registrado cada año.



**Figura 1.** Fotografías de las especies pelágicas del sargazo (tomado de Schell et al. 2015).

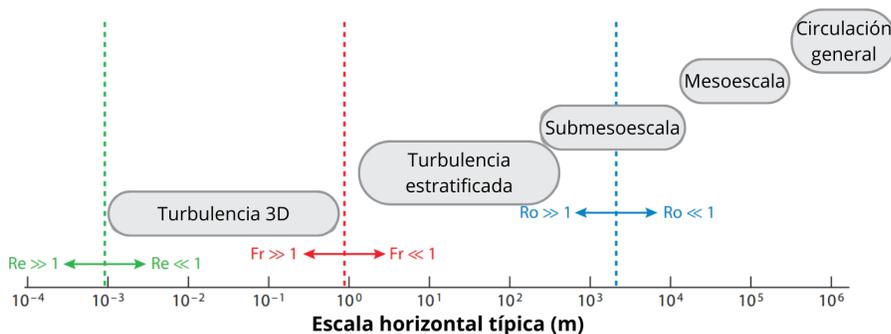
El Caribe mexicano se localiza en el mar Caribe al este de la península de Yucatán (Figura 2). Es una zona de alta importancia económica, social y cultural, además alberga gran parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano. El arribo masivo de sargazo a las costas del Caribe provoca daños socioeconómicos, ecológicos y a la salud (Tussenbroek, 2011; van Tussenbroek et al., 2017; Doyle & Franks, 2015; Hu et al., 2016; Rodríguez-Martínez et al., 2017, 2019; Rodríguez-Muñoz et al., 2021). Debido a las consecuencias

negativas ocasionadas por las grandes acumulaciones de sargazo, se han estudiado los factores que afectan su distribución y crecimiento con el fin de que sean de utilidad para los actores encargados de las actividades de atención, adaptación y mitigación de los impactos del sargazo en las costas afectadas.



**Figura 2.** Mapa de los límites territoriales, islas y mares de México. El sombreado azul indica su Zona Económica Exclusiva, siendo la porción localizada en el mar Caribe la correspondiente al Caribe mexicano (tomado de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2021).

En el océano conviven distintas escalas espaciales y temporales asociadas a los flujos oceánicos. Según la escala del fenómeno, los efectos de la rotación, estratificación y viscosidad adquieren distinta importancia en la dinámica del flujo (Figura 3; Taylor & Thompson, 2023). A este respecto, uno de los desafíos para el pronóstico de las trayectorias y eventos de arribo masivo de sargazo a las costas es que es un fenómeno tanto físico como biogeoquímico, que a su vez es afectado por procesos de diferentes escalas espaciales.



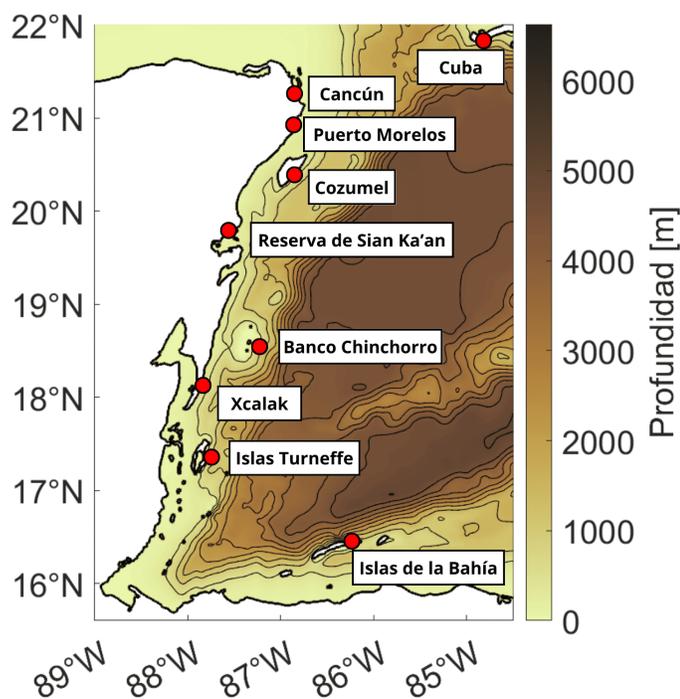
**Figura 3.** Regímenes dinámicos y parámetros adimensionales (número de Rossby (Ro), número de Froude (Fr) y número de Reynolds (Re)) en función de las escalas horizontales típicas (modificado de Taylor & Thompson 2023).

Con el fin de analizar el impacto de las escalas espaciales en el pronóstico de trayectorias y el arribo de sargazo a las costas del Caribe mexicano, en el presente trabajo se evaluó la distribución del sargazo en dicha región mediante la simulación de las trayectorias de partículas lagrangianas utilizando el software OpenDrift. Para configurar las simulaciones se utilizaron campos de corrientes con resoluciones espaciales de aproximadamente 5 y 1 km, generados con el modelo de circulación oceánica “Regional Ocean Modelling System” (ROMS, por sus siglas en inglés). Las trayectorias resultantes se compararon con el fin de evaluar si existen diferencias significativas entre predicciones con distintas resoluciones espaciales.

## 1.1. Antecedentes

### 1.1.1. Zona de estudio

La zona de estudio se ubica en el Caribe mexicano y se extiende desde los 15.6°N hasta los 22°N de latitud y desde los 89°W hasta los 84.5°W de longitud (Figura 4). A continuación se describen los aspectos más relevantes de la dinámica oceánica y atmosférica en la zona de estudio.



**Figura 4.** Mapa de la batimetría de la zona de estudio, con la ubicación y nombre de los sitios relevantes para este trabajo.

### 1.1.1.1. Circulación en el Caribe

El mar Caribe se localiza en el Atlántico tropical y está delimitado al sur por Venezuela y Colombia, al norte por las Antillas Mayores, al este por las Antillas Menores y al oeste por Centroamérica y México. El forzamiento principal de las corrientes superficiales en el mar Caribe son los vientos alisios (Wüst & Gordon, 1964; Gordon, 1967). Los rasgos más característicos de la circulación oceánica incluyen la corriente del Caribe, que fluye hacia el oeste y forma parte de la rama occidental del giro subtropical del Atlántico Norte, así como una circulación ciclónica en la cuenca de Colombia.

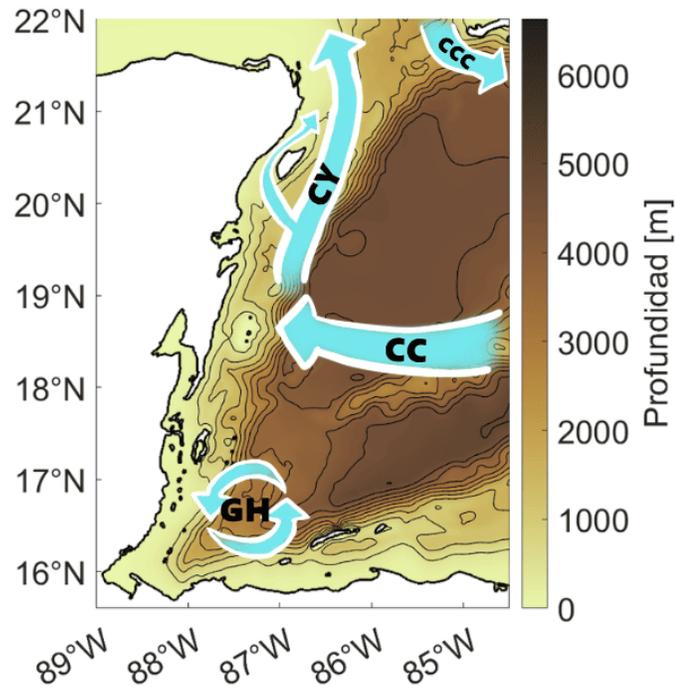
Se denomina “Caribe mexicano” a la región localizada al este de la península de Yucatán, dentro de la cuenca de Yucatán (Talley et al., 2011). En esta región, la corriente principal es la corriente de Caimán, la cual se alimenta de dos jets que atraviesan la dorsal de Jamaica. Esta corriente fluye hacia el oeste a una latitud aproximada de 19°N, hasta encontrarse con la península de Yucatán, donde diverge: una parte se mueve hacia el norte, convirtiéndose en la corriente de Yucatán, mientras que otra se dirige hacia el sur, ingresando al golfo de Honduras (Figura 5; Centurioni & Niiler, 2003; Ochoa et al., 2005; Badan et al., 2005; Ezer et al., 2005; Cetina et al., 2006; Carrillo et al., 2015).

La latitud a la que la corriente de Caimán impacta contra la península de Yucatán varía alrededor de 2°, con una migración que abarca desde la frontera de México con Belice hasta Cozumel, en escalas de tiempo cercanas a 100 días (Badan et al., 2005; Cetina et al., 2006). Este desplazamiento, junto con la presencia de estructuras como remolinos, modula la intensidad de las corrientes a lo largo de la costa (Badan et al., 2005; Ezer et al., 2005).

Las corrientes a lo largo de la costa de la península de Yucatán presentan una dirección predominante hacia el norte, con una intensificación cerca del canal de Yucatán (Badan et al., 2005; Cetina et al., 2006). La dinámica oceánica en el Caribe mexicano influye en la variabilidad del golfo de México debido a la conectividad entre ambas regiones a través del canal de Yucatán. En el lado oeste del canal, la corriente de Yucatán fluye hacia el norte con velocidades máximas de hasta 2 m/s, migrando lateralmente a lo largo del canal; en el lado este, el flujo es intermitente hacia el sur y forma parte de la contracorriente Cubana (Pillsbury, 1887; Gordon, 1967; Emilsson, 1971; Nowlin Jr, 1972; Schlitz, 1973; Carder et al., 1977; Sukhovey et al., 1980; Maul et al., 1985; Ochoa et al., 2001; Sheinbaum et al., 2002; Candela et al., 2002, 2003; Rousset & Beal, 2010, 2011; Athié et al., 2015).

En Cozumel, la corriente de Yucatán se bifurca, con aproximadamente una cuarta parte de su flujo atravesando el canal de Cozumel (Badan et al., 2005). Dentro del canal, el flujo es predominantemente

geostrófico, aunque se presentan períodos ageostrófico que tienen una duración aproximada de una semana (Chávez et al., 2003; Ochoa et al., 2005; Ezer et al., 2005; Cetina et al., 2006). La velocidad de la corriente en la parte central del canal varía en un rango de 0.2 a 1.8 m/s (Ochoa et al., 2005). Entre Cozumel y la Bahía de la Ascensión se observan flujos lentos y hacia el sur, los cuales forman una recirculación ciclónica (Carrillo et al., 2015).



**Figura 5.** Mapa de la batimetría del área de estudio con el esquema de las principales corrientes: corriente de Caimán (CC), corriente de Yucatán (CY), contracorriente Cubana (CCC) y giro de Honduras (GH).

Alrededor de Banco Chinchorro ocurren periodos de inversión del flujo (hacia el sur), asociados al paso de remolinos (Badan et al., 2005; Ezer et al., 2005; Cetina et al., 2006). Al sur de Banco Chinchorro y hasta el golfo de Honduras, las velocidades son un orden de magnitud menores en comparación con las observadas en la corriente de Yucatán. En el golfo de Honduras se encuentra el giro de Honduras, un remolino ciclónico de mesoescala con un diámetro aproximado de 200 km (Craig, 1966; Ezer et al., 2005; Carrillo et al., 2015). La intensidad de la circulación ciclónica en esta región está influenciada por la interacción con remolinos de mesoescala y la proximidad de la corriente de Caimán a la península de Yucatán (Ezer et al., 2005).

Al sur de Cuba el flujo es débil y está dominado por remolinos (Ochoa et al., 2001; Centurioni & Niiler, 2003). La circulación de la zona es anticiclónica con una predominancia en la formación de anticiclones que se desplazan hacia el oeste con velocidades de alrededor de 0.2 cm/s (Jouanno et al., 2008).

Además, al suroeste de Cuba se ha observado la formación de un par ciclón-anticiclón con diámetros del orden de 100 km. Estos se trasladan hacia la corriente de Yucatán hasta incorporarse a ella (Richardson, 2005).

### **1.1.1.2. Vientos en el Caribe**

En el mar Caribe los vientos están principalmente influenciados por la Alta Subtropical del Atlántico Norte (NASH, por sus siglas en inglés), la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) y el Jet del Caribe de Bajos Niveles (CLLJ, por sus siglas en inglés). La ITCZ es una banda de nubes convectivas profundas que se origina por la convergencia de los vientos alisios en la zona tropical. Presenta una migración estacional, desplazándose de los 9°N en el verano boreal a 2°N en el invierno. (Schneider et al., 2014).

La NASH es un centro de alta presión ubicado en el este del Atlántico subtropical. Este centro está relacionado con la producción de los vientos alisios sobre el Caribe (Wang & Lee, 2007). En la tropósfera baja (aproximadamente a 925 hPa), los vientos se intensifican (rapidez mayor a 13 m/s) influenciados por la topografía continental al ingresar desde el Atlántico norte tropical hacia el mar Caribe, formando el CLLJ.

El CLLJ muestra un ciclo semianual con un incremento en verano e invierno y debilitamiento en otoño y primavera modulado por el desplazamiento zonal de la NASH, la migración de la ITCZ y los gradientes zonales de temperatura superficial del mar entre el Pacífico y el Atlántico ecuatoriales (Wang & Lee, 2007; Muñoz et al., 2008; Whyte et al., 2008). El CLLJ afecta la distribución de humedad y precipitación sobre el Caribe (Muñoz et al., 2008; Whyte et al., 2008).

Además, las tormentas y ciclones tropicales son fenómenos importantes que afectan el campo de vientos en el Caribe. El número de tormentas tropicales en el Caribe muestra un mínimo en julio y dos máximos en junio y octubre. Este comportamiento parece estar modulado por el debilitamiento o la intensificación de los vientos alisios (Inoue et al., 2002). Además, el debilitamiento del CLLJ favorece la formación de ciclones tropicales de agosto a octubre (Wang & Lee, 2007; Wang, 2007).

En la cuenca de Yucatán, los vientos son generalmente más débiles que en el resto del Caribe y tienen una dirección dominante del este en primavera y verano, y del noreste en otoño e invierno (Pérez-

Santos et al., 2010). Su magnitud es mayor en otoño (máxima en noviembre) y decrece en las siguientes estaciones, con un máximo relativo al suroeste causado por el CLLJ durante junio (Muñoz et al., 2008; Pérez-Santos et al., 2010). Las variaciones en la escala anual son moduladas por la variabilidad estacional de los vientos alisios, siendo más fuertes cuando la NASH y la ITCZ están cerca de su posición más al sur (diciembre a marzo; Amador et al., 2006; Poveda et al., 2006; Wang, 2007; Pérez-Santos et al., 2010). La magnitud del campo de vientos exhibe un gradiente meridional disminuyendo de sur a norte de enero a septiembre y del centro hacia el norte y sur en el resto del año. Este gradiente se atribuye a la cercanía con la ITCZ (Pérez-Santos et al., 2010).

Además, durante otoño e invierno la dirección de los vientos está influenciada por frentes fríos provenientes de Norteamérica. Los frentes fríos ocurren en periodos de 2 a 16 días y se asocian a sistemas de baja presión que se mueven hacia el este a través del golfo de México (Fernandez-Partagas & Mooers, 1975; Pérez-Santos et al., 2010).

### **1.1.2. Sargazo**

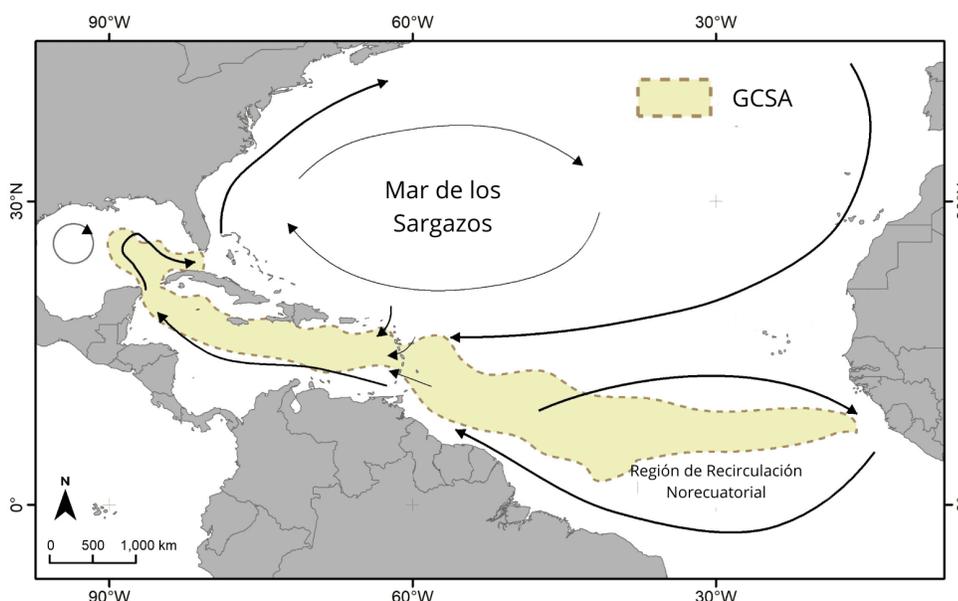
Antes del 2011, las acumulaciones más extensas de sargazo pelágico se concentraban principalmente en el Mar de los Sargazos (Figura 6), el cual se ubica dentro del giro subtropical del Atlántico norte, entre las longitudes 40 y 70°W y las latitudes 25 y 35°N (Parr, 1939; Butler et al., 1983; Smetacek & Zingone, 2013; Dreckmann & Sentías, 2013; Gower et al., 2013). Entre 2000 y 2010 se registró una baja abundancia de sargazo en el Atlántico tropical. Sin embargo, en el 2011 se detectó un incremento masivo que dió origen al GCSA (Franks et al., 2011, 2016; Dreckmann & Sentías, 2013; Gower et al., 2013; Wang et al., 2019).

A partir del 2011, la cantidad de biomasa de sargazo ha presentado un aumento sostenido (Uribe-Martínez et al., 2022). A finales del 2014, se registró el primer arribo masivo de sargazo en el Caribe mexicano (Rodríguez-Martínez et al., 2017; Cuevas et al., 2018; Wang et al., 2019). En 2018, se presentó la mayor concentración de sargazo registrada en el mar Caribe y el Atlántico tropical (Rodríguez-Martínez et al., 2019, 2022; Wang et al., 2019).

La distribución de sargazo sigue un patrón estacional, presentando un pico en el oeste del Atlántico tropical y el mar Caribe durante el verano, y altas cantidades en otoño e invierno localizadas por debajo de la ITCZ (Wang et al., 2019; Jouanno et al., 2023). Aunque presenta estacionalidad, este fenómeno

exhibe variaciones interanuales importantes (Wang et al., 2019; Skliris et al., 2022; Uribe-Martínez et al., 2022; Jouanno et al., 2023).

La distribución y el tamaño de las conglomeraciones de sargazo están influenciados por su crecimiento y la dinámica oceánica y atmosférica (Butler et al., 1983; Brooks et al., 2018; Putman et al., 2020; Marsh et al., 2021; Skliris et al., 2022; Uribe-Martínez et al., 2022). Se han identificado varios factores que influyen en su crecimiento, como la temperatura superficial del mar (Hanisak & Samuel, 1987; Wang et al., 2019; Magaña-Gallegos et al., 2023), la salinidad (Hanisak & Samuel, 1987), la cantidad de radiación solar (Lapointe, 1995) y la disponibilidad de fosfato (Lapointe, 1986).



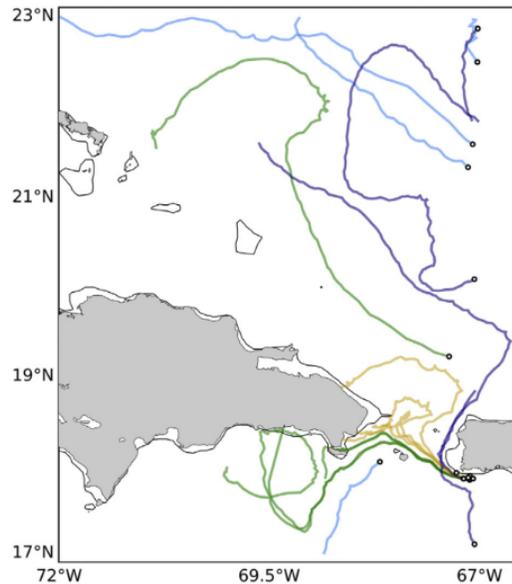
**Figura 6.** Esquema de los patrones principales de corrientes oceánicas y localización del Mar de los Sargazos y del Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GCSA; modificado de Uribe-Martínez et al. 2022).

También se ha analizado el rol del esfuerzo del viento (Putman et al., 2018, 2020, 2023; Johns et al., 2020; Berline et al., 2020; Johnson et al., 2021; van Sebille et al., 2021; Podlejski et al., 2023; Lara-Hernández et al., 2024), las corrientes (Podlejski et al., 2023; Lara-Hernández et al., 2024), los efectos inerciales (aquellos efectos debidos a la flotabilidad, tamaño y forma del sargazo; Beron-Vera et al., 2015; Beron-Vera & Miron, 2020; Beron-Vera, 2021; Brooks et al., 2019; Miron et al., 2020; Andrade-Canto et al., 2022) y la fisiología (crecimiento, mortalidad y reproducción; Brooks et al., 2018; Jouanno et al., 2021; Lara-Hernández et al., 2024) en el transporte del sargazo. Además se han identificado rutas de transporte/transición a lo largo del Océano Atlántico (Franks et al., 2016; Putman et al., 2018; Brooks et al., 2018; Beron-Vera et al., 2022; Allende-Arandía et al., 2023).

### 1.1.2.1. Estudio del sargazo con aproximaciones Lagrangianas

Un flujo se puede describir a través de dos aproximaciones, la Euleriana y la Lagrangiana. Desde la perspectiva Euleriana se estudian las propiedades del campo de flujo en puntos fijos en el espacio. Por otro lado, desde la aproximación Lagrangiana se describe el campo a partir de elementos individuales que son advectados por el flujo, rastreando sus trayectorias y el cambio en sus propiedades.

Debido a las propiedades de flotabilidad del sargazo, es posible tratarlo desde un enfoque Lagrangiano por medio del seguimiento de partículas (Figura 7). El modelado con partículas permite caracterizarlas para representar rasgos del sargazo que afectan su distribución, como su crecimiento, mortalidad, flotabilidad, entre otros.



**Figura 7.** Ejemplo de Putman et al. 2020, los cuales utilizaron un enfoque Lagrangiano para analizar el sargazo. Las curvas verdes representan las trayectorias de derivadores diseñados para asemejarse a las matas de sargazo, las amarillas corresponden a las trayectorias de matas de sargazo rastreadas mediante GPS, las azul oscuro representan trayectorias de derivadores con lastre, y las azul claro muestran las trayectorias de derivadores sin lastre.

Estudios han utilizado esta aproximación para encontrar rutas de transporte (Franks et al., 2016; Brooks et al., 2018; Putman et al., 2018; Johns et al., 2020; Berline et al., 2020) y regiones de agregación de sargazo en el Atlántico (Franks et al., 2016; Berline et al., 2020), así como evaluar su interacción con remolinos (Brooks et al., 2019; Beron-Vera & Miron, 2020; Andrade-Canto et al., 2022).

Además se ha analizado el comportamiento del sargazo al caracterizar las partículas para incluir los efectos inerciales (Brooks et al., 2019; Beron-Vera & Miron, 2020; Miron et al., 2020; Andrade-Canto

et al., 2022), su fisiología (Brooks et al., 2018; Marsh et al., 2021; Lara-Hernández et al., 2024) y el efecto del arrastre del viento (Putman et al., 2018, 2020; Johns et al., 2020; Berline et al., 2020; Marsh et al., 2021; Lara-Hernández et al., 2024) en las velocidades de advección de las partículas.

Entre los resultados principales de dichos estudios se han identificado rutas de transporte y dos regiones de agregación en el Atlántico ecuatorial (Franks et al., 2016; Brooks et al., 2018; Putman et al., 2018; Johns et al., 2020; Berline et al., 2020). Asimismo, se ha observado que las simulaciones que incluyen el efecto del arrastre del viento (Putman et al., 2018, 2020; Johns et al., 2020; Berline et al., 2020; Marsh et al., 2021; Lara-Hernández et al., 2024) y los efectos inerciales (Brooks et al., 2019; Beron-Vera & Miron, 2020; Miron et al., 2020; Andrade-Canto et al., 2022) se ajustan mejor a las distribuciones observadas de sargazo. Además, los resultados sugieren que incluir la fisiología sólo es relevante en el orden de meses y no en escala de días (Lara-Hernández et al., 2024).

### 1.1.2.2. Papel del viento en el transporte del sargazo

El sargazo es transportado en el océano por las corrientes superficiales y el viento (Carpenter & Cox, 1974; Lapointe, 1995; Lapointe et al., 2014; Webster & Linton, 2013; Maréchal et al., 2017). El viento influye en las diferencias estacionales de distribución de sargazo (Putman et al., 2018), conectividad y rutas de transición entre regiones (Johns et al., 2020; Johnson et al., 2021; Beron-Vera et al., 2022), variaciones interanuales en los florecimientos (Skliris et al., 2022) y varamientos en costa (Putman et al., 2023; Lara-Hernández et al., 2024). Además se ha sugerido que el movimiento de boyas de deriva y derivadores sin lastre representan adecuadamente la deriva de sargazo (van Sebille et al., 2021; Beron-Vera et al., 2022).

Al simular la deriva de sargazo, se ha observado que uno de los factores que hacen que las distribuciones modeladas se asemejen a las observadas es incluir el efecto del arrastre del viento en las velocidades de advección (Putman et al., 2018, 2020, 2023; Berline et al., 2020; Johnson et al., 2021; Lara-Hernández et al., 2024). Este efecto es añadido según la ecuación:

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = \vec{u}_o(\vec{x}, t) + a\vec{u}_v(\vec{x}, t) \quad (1)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $\vec{x}$  es el vector de posición de la partícula,  $\vec{u}$  es la velocidad de advección de la

partícula,  $\vec{u}_o$  es la velocidad de la corriente oceánica superficial,  $\vec{u}_v$  es la velocidad del viento y  $a$  es el factor de arrastre del viento (Dagestad & Röhrs, 2019).

Para el caso del sargazo se han registrado valores del factor de arrastre  $a$  entre 0.5 y 3 % (Putman et al., 2018, 2020; Johns et al., 2020; Berline et al., 2020; Johnson et al., 2021; Podlejski et al., 2023; Lara-Hernández et al., 2024). Además, se ha observado que en el Caribe mexicano los varamientos en costa aumentan linealmente con el incremento de este factor (Lara-Hernández et al., 2024).

Por otro lado, se ha estudiado la respuesta del sargazo ante eventos extremos de viento, como lo son los ciclones tropicales (Sosa-Gutierrez et al., 2022). Sosa-Gutierrez et al. (2022) compararon la cobertura de sargazo antes y después del paso de ciclones tropicales. Encontraron que la cobertura comienza a disminuir 2 días antes del paso del ciclón, y que ésta se reduce en promedio un 40 % y llega a ser de hasta 60 % en ciclones más intensos. Sugieren que la disminución es debida al hundimiento del sargazo. Señalan que los ciclones pueden contribuir al patrón estacional del sargazo, el cual presenta una mayor reducción en septiembre, que es el mes con mayor número de ciclones.

## 1.2. Justificación

El estudio de la dinámica del sargazo en el Caribe mexicano es fundamental para desarrollar modelos de pronóstico eficientes de arribazones que sirvan como base para estimar los daños asociados a su llegada e implementar estrategias de mitigación y adaptación oportunas. Para recolectar las grandes cantidades de sargazo que arriban a las costas se ha optado por dos estrategias: recolección en playa y en mar abierto (Figura 8). Sin embargo, si no se hacen con una planeación adecuada, ambas pueden ocasionar daños ecológicos y ambientales (Rodríguez-Martínez et al., 2017).

Es por esto que cuantificar en forma precisa la cantidad, los posibles sitios de varamiento y tiempos de arribo a las costas del sargazo es de suma importancia. Para contribuir en el desarrollo de los sistemas de pronóstico, en este trabajo se compararon las distribuciones de sargazo generadas en salidas de modelos con resoluciones espaciales a 5 y 1 km. Identificar si las distribuciones generadas en ambas configuraciones son muy distintas entre si, contribuirá a entender si es necesario utilizar modelos de alta resolución (1 km) en el pronóstico de arribazones de sargazo.



**Figura 8.** Fotografías de remoción del sargazo en el Caribe mexicano en: (a-c) la playa y (d) aguas costeras. (e) Recuperación de arena (una gran cantidad de arena es removida durante las actividades de limpieza del sargazo en las playas). (f) Albercas de lixiviados producidas por una gran acumulación de sargazo varado en la playa (tomado de Chávez et al. 2020).

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la resolución espacial en la distribución del sargazo en el Caribe mexicano.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Validar las salidas del modelo hidrodinámico.
- Diseñar los experimentos para estudiar la distribución del sargazo en el 2022-2023 utilizando partículas lagrangianas y corrientes del modelo de circulación oceánica ROMS.
- Comparar y evaluar la distribución de las partículas lagrangianas en la solución de configuraciones a 1 y 5 km.

## Capítulo 2. Metodología

---

### 2.1. Modelos numéricos

Con el fin de comparar el impacto de la resolución espacial en la distribución y transporte del sargazo, así como contribuir al desarrollo de un sistema de pronóstico operacional de arribazones de sargazo en el Caribe mexicano, se utilizó el modelo hidrodinámico ROMS. ROMS es un modelo numérico regional de superficie libre, cuatro dimensiones (3 espaciales y el tiempo) que resuelve las ecuaciones primitivas utilizando las aproximaciones hidrostática y de Boussinesq. Trabaja en una malla de tipo Arakawa-C (Arakawa, 1972) con coordenadas verticales que siguen la batimetría (coordenadas sigma) y coordenadas curvilíneas ortogonales en la horizontal (Haidvogel & Beckmann, 1999; Shchepetkin & McWilliams, 2005, 2009; Haidvogel et al., 2008). Para ver una descripción más detallada del modelo ROMS se invita al lector a revisar el sitio web: [https://www.myroms.org/wiki/Documentation\\_Portal](https://www.myroms.org/wiki/Documentation_Portal).

Las simulaciones se realizaron utilizando el dominio numérico que se muestra en la Figura 9a. A este dominio se le denominó “malla madre” y se extiende desde los 15.6°N hasta los 30.5°N de latitud y desde los 98°W hasta los 79°W de longitud, con una resolución espacial de 5 km (327x375 puntos de malla). Consta de 36 niveles sigma en la vertical para los cuales se utilizó un método de estiramiento que aumenta la resolución cerca de la superficie (Souza et al., 2015). Además, se utilizó el esquema de mezcla vertical KPP (Large et al., 1994).

El modelo oceánico fue forzado usando datos atmosféricos del sistema de pronóstico global “Global Forecast System” (GFS, por sus siglas en inglés). GFS es un sistema de pronóstico del tiempo atmosférico con resolución espacial de 1/4° y temporal de 3 horas (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>). Las variables utilizadas para forzar la superficie del modelo fueron: temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión atmosférica, precipitación, nubosidad, velocidad del viento y radiación de onda corta y larga.

Para las condiciones oceánicas iniciales y de frontera se utilizaron los datos del modelo global de circulación oceánica MERCATOR por el “European Copernicus Marine Environment Monitoring Service” (CMEMS, por sus siglas en inglés). El modelo MERCATOR tiene una resolución espacial de 1/12° y brinda 10 días de pronóstico de corrientes, temperatura, salinidad, entre otras variables hidrodinámicas ([https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL\\_ANALYSISFORECAST\\_PHY\\_001\\_024/de](https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024/de)

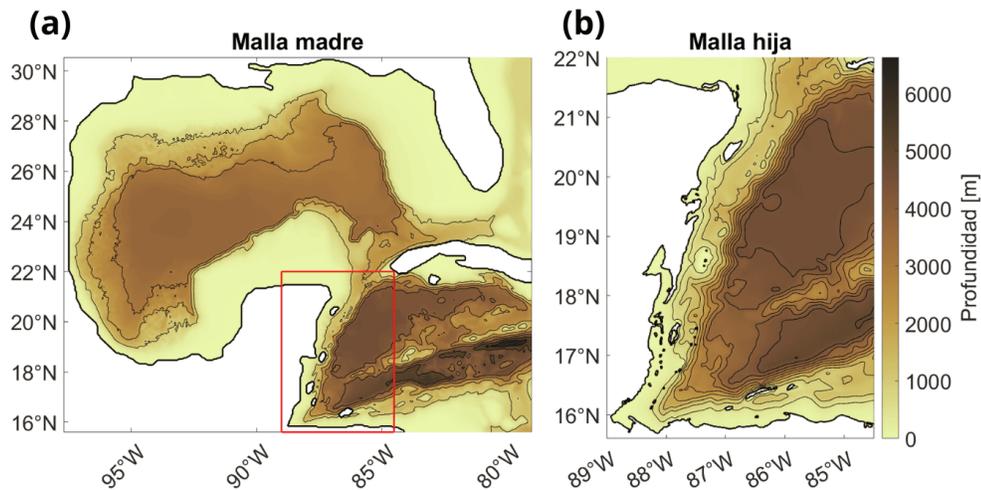
scription). Las variables utilizadas fueron: altura del nivel del mar, temperatura potencial, salinidad y velocidad meridional y zonal.

La batimetría se construyó por medio de una combinación de mediciones de cruceros en el golfo de México con la base de datos “Carta General Batimétrica de los Océanos” (<https://www.gebco.net/>). La información de descargas de ríos fue añadida considerando datos (desde 1978 al 2015) de los sistemas Mississippi/Atchafalaya y Usumacinta/Grijalva, así como de 81 puntos de descarga ubicados en las plataformas de Florida, Texas y Yucatán. Cabe destacar que a pesar de que no hay presencia de ríos en la plataforma de Yucatán, existen aportes de agua dulce por medio de descargas de agua subterránea ligados a los sistemas de cenotes (Pope et al., 1991; Herrera-Silveira et al., 2002; Gallardo & Marui, 2006). Su contribución se estimó por medio del ajuste del modelo con datos in-situ de salinidad y temperatura. A partir de esta base de datos se calculó una climatología que se usó para alimentar al modelo en los principales puntos de descarga. Para más detalles sobre la batimetría y la construcción de la base de datos de ríos consultar Estrada-Allis et al. (2019).

La ejecución de la malla madre se realizó en “modo pronóstico”, el cual consta de dos fases: “Reinicio” y “Libre”. En la fase “Reinicio” se utilizan las condiciones iniciales y de frontera de MERCATOR y los forzamientos atmosféricos de GFS, y se lleva a cabo en las etapas “Hindcast” y “Forecast”. Durante la etapa “Hindcast” los datos oceánicos y atmosféricos del día de simulación actual se repiten a lo largo de los 6 días previos para ajustar la solución del día simulado y mejorar el desempeño del pronóstico. De esta forma se ejecuta el modelo durante 7 días, desde 6 días anteriores hasta el día actual. En la etapa “Forecast” se utiliza la solución del último día del “Hindcast” para iniciar el modelo, y se ejecuta durante 9 días utilizando las condiciones de frontera de MERCATOR. La fase “Reinicio” se ejecuta una vez cada 7 días. En la fase “Libre” el modelo se ejecuta durante 6 días después de la fase “Reinicio”. Algunas de las ventajas de ejecutar el modelo en “modo pronóstico” son: aumentar la resolución espacial y temporal, añadir más variables de salida, incluir otros cálculos (por medio de la activación de otros módulos de ejecución, o programándolos directamente en el modelo) y la capacidad de correr el modelo múltiples veces según sea requerido.

Con el fin de aumentar la resolución espacial, se anidó el modelo de la malla madre a la zona que se muestra en la Figura 9b. A este anidado se le denominó “malla hija” y se extiende desde los 15.6°N hasta los 22°N de latitud y desde los 89°W hasta los 84.5°W de longitud, con una resolución espacial de 1 km (678x451 puntos de malla). La resolución se aumentó a 1 km para reproducir fenómenos oceánicos de pequeña escala que el modelo de 5 km no logra capturar. La malla hija tiene 45 niveles sigma en la vertical. Para la batimetría se interpoló la de la malla madre a 1 km y se suavizó para reducir al máximo

el error que tienen los modelos en coordenadas sigma al calcular el gradiente de presión.



**Figura 9.** Mapas de la batimetría de la zona de estudio donde (a) es el dominio numérico de la malla madre con resolución espacial de 5 km. El recuadro rojo denota el dominio numérico del anidado de la malla hija mostrado en (b) con resolución espacial de 1 km.

La solución en la malla hija se obtuvo por medio del método de reducción de escala de una vía “offline”, lo que significa que los resultados de la malla hija no afectan a los de la malla madre. El método de proyección dinámica por reducción de escala o “downscaling” es una técnica ampliamente utilizada tanto en la predicción atmosférica como en la oceánica. Consiste en utilizar un modelo de pronóstico, por lo general de escala global y con asimilación de datos, como condiciones iniciales y de frontera para alimentar el nuevo pronóstico de menor escala espacial y con ello, transferir la información dinámica del pronóstico con resolución gruesa a otro de resolución más fina (Hoai et al., 2011; Kourafalou et al., 2015). Por lo regular el método de “downscaling” se utiliza en modelos regionales en los que es necesario interpolar los datos de la malla madre a las fronteras de la malla hija para obtener sus condiciones de frontera o a todo su dominio para obtener las condiciones iniciales a partir de las cuales se integra el modelo dinámico sobre la malla hija (de alta resolución).

De esta forma, se utilizó la solución de la malla madre, previamente ejecutada en modo pronóstico, en las condiciones oceánicas iniciales y de frontera de la malla hija. Estos datos tienen una resolución espacial de 5 km y temporal de 12 horas. A diferencia de la malla madre, en la malla hija sólo se ejecuta la etapa “Forecast” una vez concluida esta misma etapa en la malla madre. Además, los forzamientos atmosféricos de la malla hija son los mismos que los de la madre (GFS).

Las simulaciones de las mallas madre e hija comprenden el periodo del 1 de agosto del 2022 al 27 de julio del 2023, y los datos de salida son promedios diarios con resoluciones espaciales de 5 km y 1 km,

respectivamente. En la Tabla 1 se resumen los parámetros de configuración de ambas mallas.

Con el fin de cuantificar el varamiento y transporte de sargazo, se utilizó un modelo de advección de partículas lagrangianas llamado OpenDrift. OpenDrift es un software escrito en Python para la modelación de trayectorias de partículas Lagrangianas en el océano o la atmósfera que permite datos de entrada (vientos, corrientes y oleaje) de una amplia variedad de modelos (Dagestad et al., 2018). Para resolver las ecuaciones de advección utiliza el método de integración de Runge-Kutta de cuarto orden. Además, permite caracterizar las partículas por medio de la modificación de parámetros como su flotabilidad, radio, profundidad de sembrado, entre otros, lo que lo hace muy útil en aplicaciones relacionadas con la dispersión de contaminantes y elementos biológicos. Para obtener una descripción más detallada del modelo se invita al lector a consultar el sitio web: <https://opendrift.github.io/>.

**Tabla 1.** Especificaciones de las configuraciones de ROMS.

Parámetro	Malla madre	Malla hija
Resolución espacial	5 km	1 km
Puntos de malla	327x375	678x451
Niveles sigma	36	45
Parámetros para transformación a coordenadas sigma	$\theta_s = 6.5, \theta_b = 2,$	$\theta_s = 6.5, \theta_b = 4$
Forzamiento atmosférico	GFS	GFS
Condiciones oceánicas iniciales y de frontera	MERCATOR	Las de la malla madre

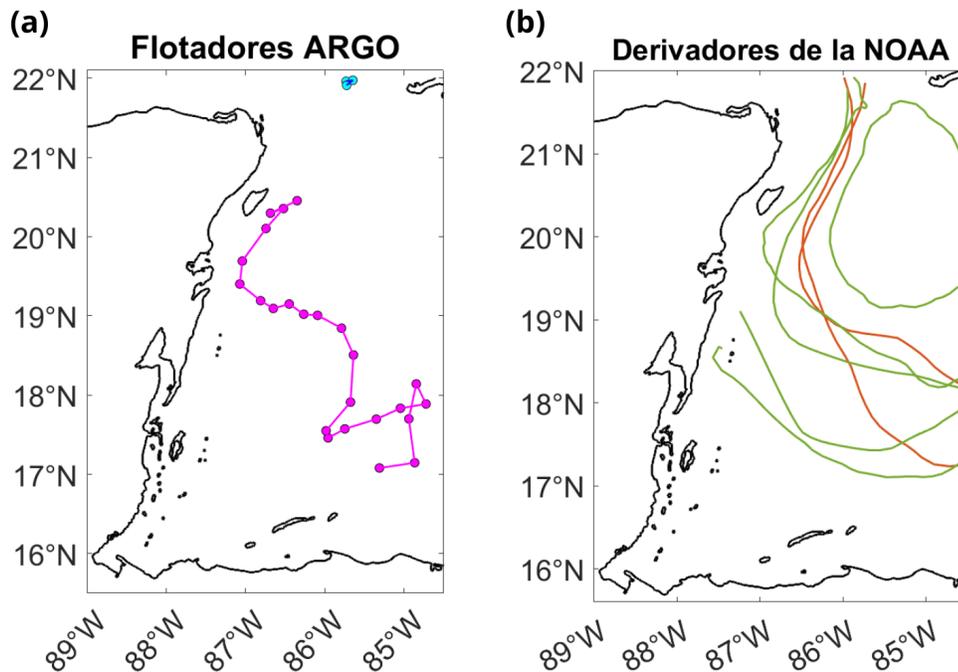
Para analizar y comparar la distribución del sargazo en las soluciones de ambas mallas se analizaron cuatro eventos dentro del periodo de simulación: del 7 al 17 de agosto de 2022 (caso “Promedio”), del 1 al 11 de noviembre de 2022 (caso “Huracán”), del 30 de marzo al 9 de abril del 2023 (caso “Rossby”) y del 10 al 20 de junio del 2023 (caso “Anticiclón”). La elección de estos experimentos se hizo con base en la dinámica y condiciones atmosféricas de la zona de estudio y se explicará más adelante en el **Capítulo 3: Resultados**.

## 2.2. Datos observacionales

Las salidas de los modelos se validaron con observaciones a fin de asegurar una buena representación de la dinámica más relevante de la zona de estudio y comprobar el correcto funcionamiento de los modelos. Para ese fin, se utilizaron productos satelitales, flotadores ARGO y boyas a la deriva, las cuales se describen a continuación.

Se utilizaron los campos de altura del nivel del mar y temperatura superficial del mar de los productos "Global Ocean Gridded L4 Sea Surface Heights And Derived Variables Nrt" (<https://doi.org/10.48670/moi-00149>) y "Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis" (<https://doi.org/10.48670/moi-00165>), respectivamente. Ambos son productos satelitales diarios provistos por el CMEMS. El primero tiene una resolución espacial de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  y el segundo de  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ .

Además, se compararon perfiles verticales de temperatura y salinidad de ambas mallas con trayectorias de flotadores del programa internacional ARGO y los programas nacionales que contribuyen en él (<https://argo.ucsd.edu>, [://www.ocean-ops.org](https://www.ocean-ops.org)). ARGO es un programa de monitoreo del océano que utiliza flotadores a la deriva que perfilan la columna de agua hasta los 2000 m de profundidad (Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico de la NOAA, 2024). Se utilizaron datos de dos plataformas, obteniendo un total de 27 perfiles que abarcan el periodo del 8 de agosto del 2022 al 23 de marzo del 2023. La ubicación de los perfiles utilizados se muestra en la Figura 10a. En el **Anexo A** se muestra información detallada de cada perfil (Tabla 3A).



**Figura 10.** (a) Ubicación de las inmersiones de las flotas de ARGOS. Los puntos magentas corresponden a los perfiles de la plataforma 4901716 y los azules a la 4903354. (b) Trayectoria de las boyas del Programa Global de Derivadores de la NOAA. Las curvas naranjas indican las boyas con lastre y las verdes sin lastre.

Para cuantificar las diferencias entre los resultados del modelo ROMS y los datos observacionales de temperatura superficial del mar, altura del nivel del mar y los perfiles verticales de los flotadores ARGO, se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y el sesgo (BIAS, por sus

siglas en inglés).

El RMSE es un estimador de la diferencia entre los valores observados y los predichos por un modelo. Se calcula por medio de la ecuación:

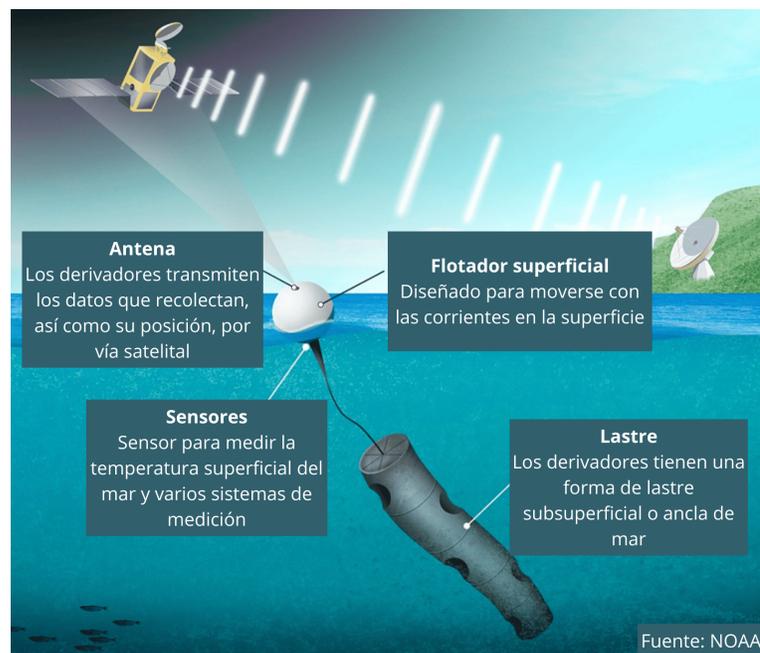
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n}} \quad (2)$$

donde  $\hat{x}_i$  son los datos del modelo,  $x_i$  son los datos de las observaciones y  $n$  es el número de observaciones.

Por otro lado, el BIAS es la diferencia del valor del modelo con el observado. Se calcula según la ecuación:

$$BIAS = \hat{x}_i - x_i \quad (3)$$

donde  $\hat{x}_i$  son los datos del modelo y  $x_i$  los datos de las observaciones.



**Figura 11.** Diagrama de los componentes principales de un derivador superficial del Programa Global de Derivadores de la NOAA (modificado de National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024).

Para validar las trayectorias generadas en OpenDrift se utilizaron datos interpolados cada seis horas de boyas del "Global Drifter Program de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)" (<https://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/interpolated/data/all.php>). Se utilizaron los datos de 7 boyas, 2 con lastre y 5 sin lastre. El lastre (Figura 11) se extiende hasta una profundidad de 20 metros y está diseñado para disminuir el arrastre debido al viento y el oleaje, de forma que el derivador sea transportado por las corrientes oceánicas cercanas a la superficie (National Oceanic and Atmospheric

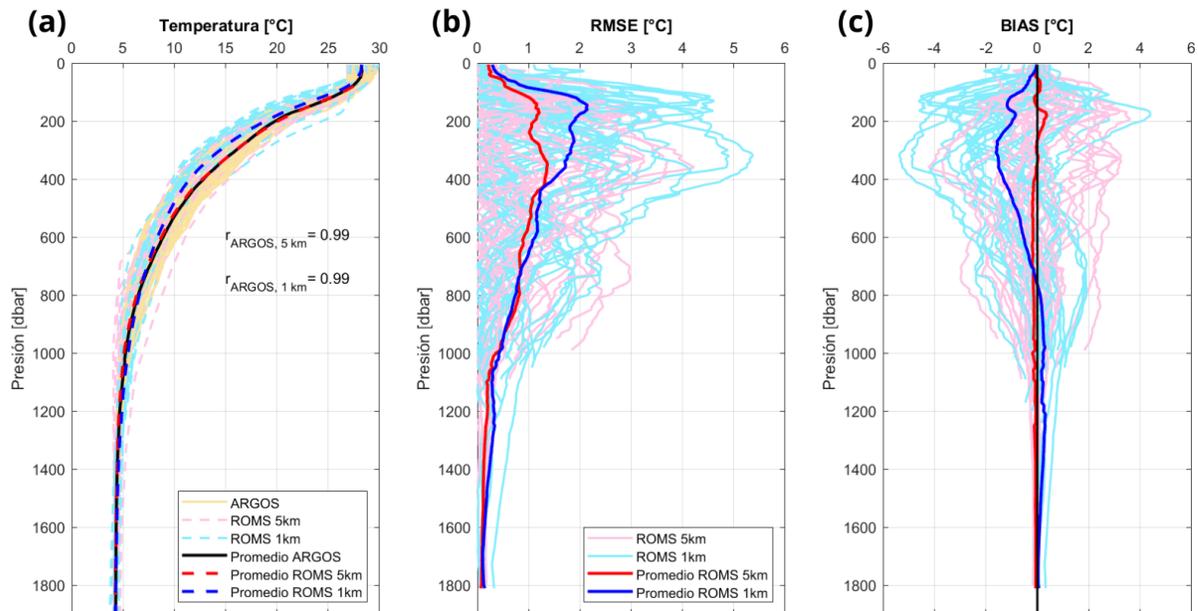
Administration, 2024). Las trayectorias de los derivadores utilizados para la validación se muestran en la Figura 10b. En el **Anexo B** se muestran los identificadores de cada boya y sus periodos dentro del área de estudio (Tabla 4B).

## Capítulo 3. Resultados

### 3.1. Validación del modelo ROMS

#### 3.1.1. Flotadores del programa ARGO

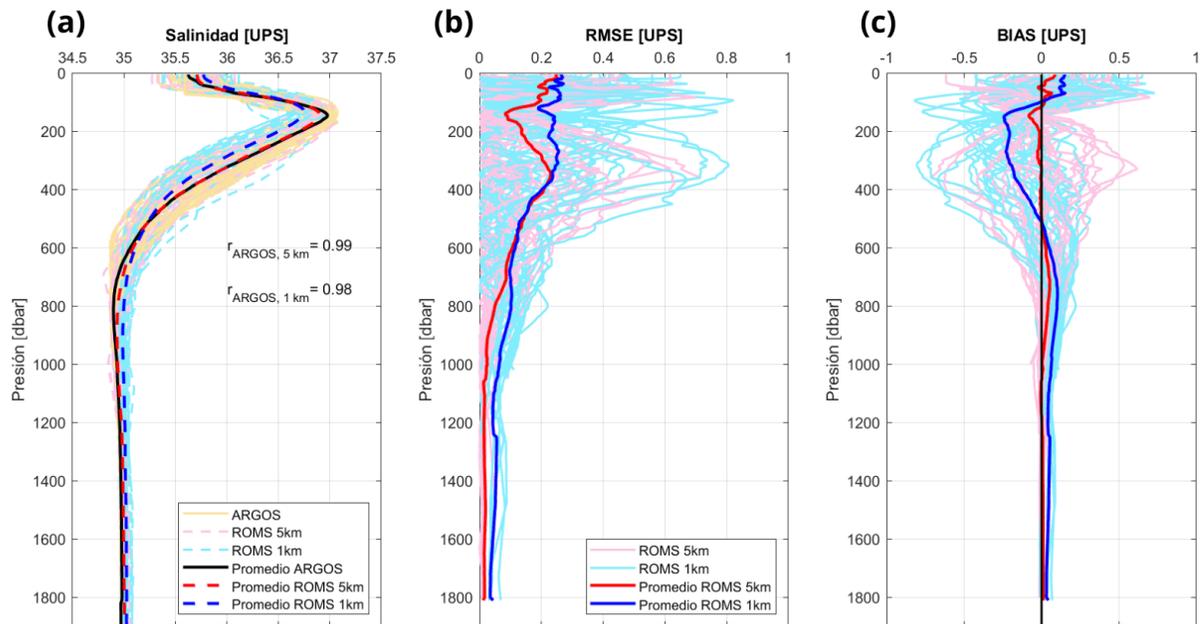
Para asegurar que las salidas del modelo ROMS representan correctamente la temperatura y salinidad en la zona de estudio, se compararon 27 perfiles de ambas variables de mediciones de flotadores del programa ARGO con los perfiles correspondientes de las mallas madre e hija. Además, se calcularon el RMSE y BIAS, tanto para la temperatura (Figura 12) como para la salinidad (Figura 13).



**Figura 12.** (a) Comparación de perfiles de temperatura de las simulaciones y los perfiladores ARGO. (b) RMSE de los perfiles de temperatura en ambas mallas. (c) BIAS de los perfiles de temperatura en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una temperatura mayor (menor) que las observaciones.

Los coeficientes de correlación entre los perfiles promedio de las observaciones de salinidad (temperatura) y las salidas de cada configuración son de 0.99 (0.99) para la malla madre y 0.98 (0.99) para la hija (en todos los casos  $p\text{-value} > 0.05$ ). En ambas variables el RMSE y el BIAS son mayores en la malla hija que en la madre. Además, los valores más altos de RMSE se observan en los primeros 500 dbar. En promedio, las temperaturas de las observaciones son mayores a las del modelo en un rango de 0.5 a 2 °C

a presiones menores de 800 dbar. En el caso de la salinidad, ésta es mayor en los modelos que en las observaciones con valores dentro del rango de 0.1 a 0.22 UPS de 0 a 100 dbar y menor a 0.1 UPS de 100 a 500 dbar aproximadamente. Cabe destacar que, a pesar de estos sesgos, los valores de temperatura y salinidad se encuentran dentro del rango de variabilidad de las mediciones de ARGO.



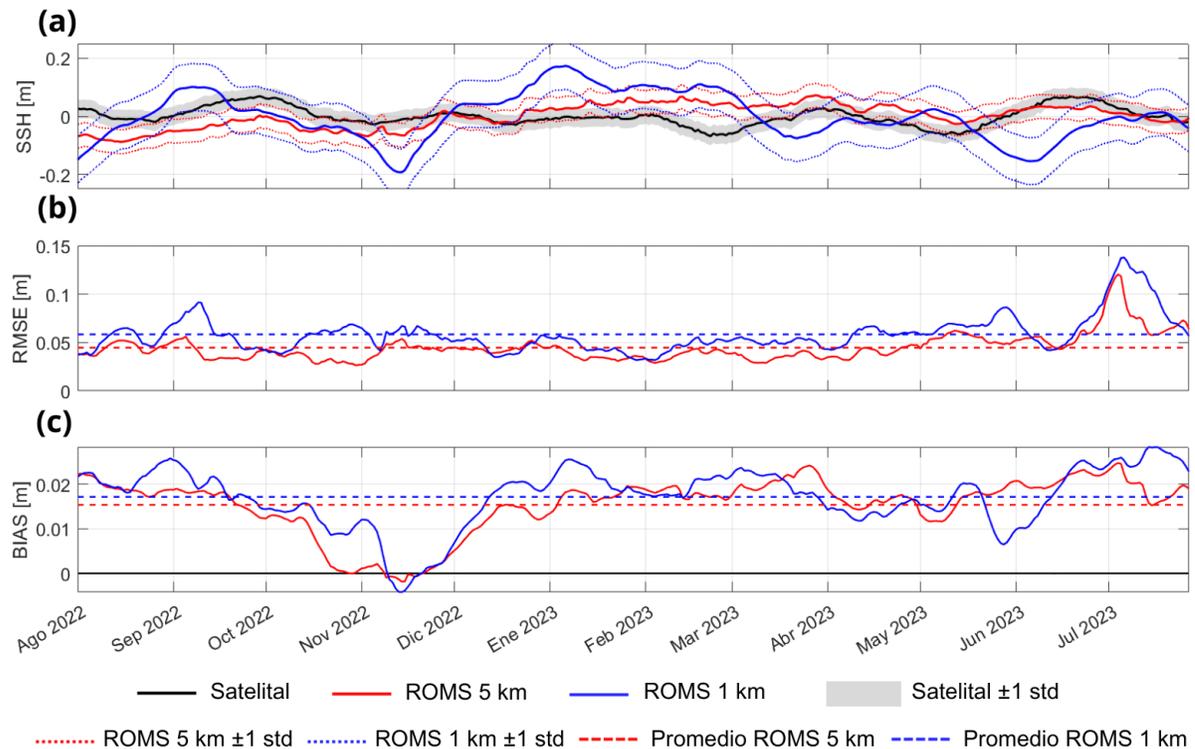
**Figura 13.** (a) Comparación de perfiles de salinidad de las simulaciones y los perfiladores ARGO. (b) RMSE de los perfiles de salinidad en ambas mallas. (c) BIAS de los perfiles de salinidad en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una salinidad mayor (menor) que las observaciones.

### 3.1.2. Altura del nivel del mar y temperatura superficial

Con el fin de validar los campos de altura del nivel del mar (SSH, por sus siglas en inglés) y temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) del modelo ROMS, se compararon las salidas con observaciones satelitales de los productos descritos en el **Capítulo 2**. Para comparar los campos de SST y SSH se interpolaron las mallas de los productos satelitales a las del modelo (con la finalidad de realizar una comparación uno a uno sin reducir la cantidad de información) y se calcularon el RMSE y BIAS en cada cuadro de malla. En todos los casos se excluyeron los datos localizados en zonas con profundidades menores a 200 m.

Se obtuvieron las series temporales de SSH y SST en el área de estudio (Figuras 14 y 15, respectivamente). Además, se calcularon el RMSE y el BIAS. En ambas variables, tanto el RMSE como el BIAS son

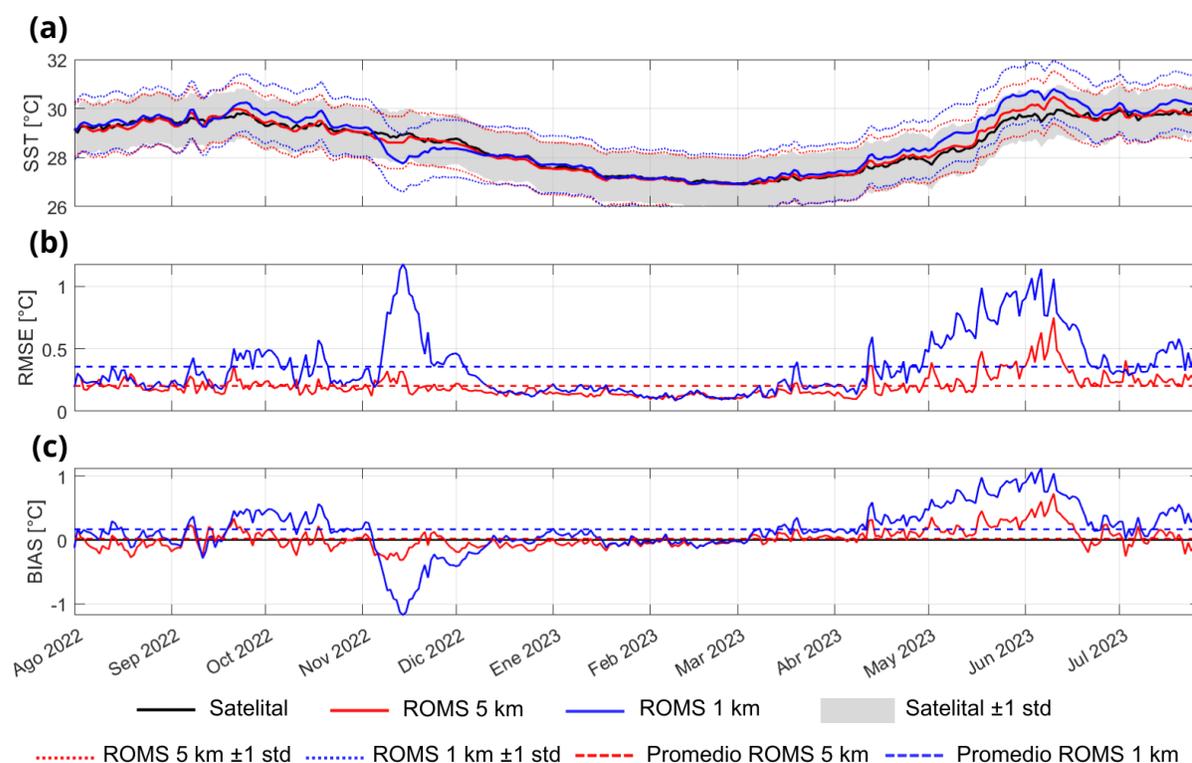
mayores en la malla hija que en la madre (Figuras 14b, c y 15b, c). En el caso de la SSH, se registraron los valores más altos de RMSE desde finales de junio hasta el final de la simulación (Figura 14b). En general, ambas mallas sobreestiman la SSH excepto en un periodo a mediados de noviembre de 2022 (Figura 14c).



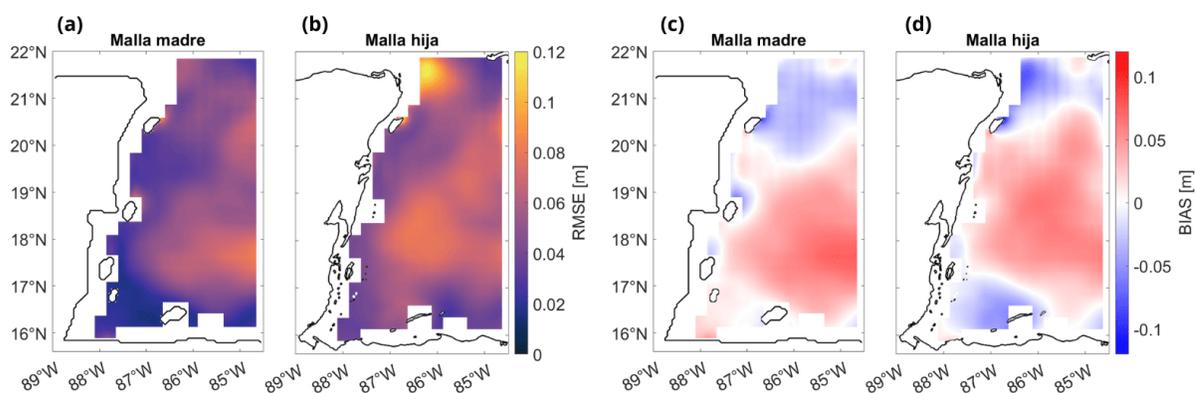
**Figura 14.** (a) Comparación de series temporales de altura del nivel del mar (SSH) en la zona de estudio. Las curvas negra, roja y azul corresponden a las observaciones satelitales, malla madre y malla hija, respectivamente. (b) RMSE de las series temporales de SSH en ambas mallas. (c) BIAS de las series temporales de SSH en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SSH mayor (menor) que las observaciones.

El RMSE de la SST (Figura 15b) con la malla hija muestra dos periodos con valores altos: de noviembre a diciembre del 2022 y de mayo a julio del 2023. En este último el RMSE de la malla madre también es mayor a la media (Figura 15b). Durante noviembre la malla hija presenta temperaturas menores que las observadas y de mayo a julio ambas mallas exhiben temperaturas mayores (Figura 15c).

También se compararon los campos de SSH y SST espacialmente (Figuras 16 y 17, respectivamente). Los resultados mostraron que en ambas mallas, la SSH tiende a ser menor a la observada cerca de las costas y mayor en mar abierto al centro del dominio (Figura 16c y d). Los valores más altos de RMSE de SSH, con máximos de 0.12 m, se presentan al suroeste del dominio en la malla madre (Figura 16a) y en la costa norte de Quintana Roo en la malla hija (Figura 16b).



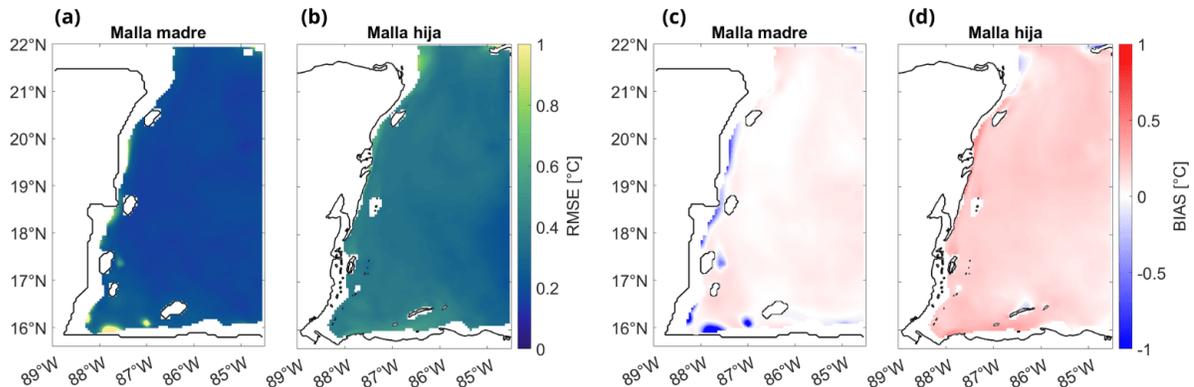
**Figura 15.** (a) Comparación de series temporales de temperatura superficial del mar (SST) en la zona de estudio. Las curvas negra, roja y azul corresponden a las observaciones satelitales, malla madre y malla hija, respectivamente. (b) RMSE de las series temporales de SST en ambas mallas. (c) BIAS de las series temporales de SST en ambas mallas. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SST mayor (menor) que las observaciones.



**Figura 16.** Promedios temporales (del 1 de agosto del 2022 al 27 de julio de 2023) de RMSE de la altura del nivel del mar de (a) malla madre y (b) malla hija y BIAS de la altura del nivel del mar de (c) malla madre y (d) malla hija. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SSH mayor (menor) que las observaciones.

En la mayor parte del dominio, en ambas mallas el modelo tiende a sobreestimar la SST de los productos satelitales, además, los valores más altos superan los  $0.5^{\circ}\text{C}$  y se localizan a lo largo de la costa de la

península de Yucatán y en el golfo de Honduras (Figura 17c y d). El RMSE de la SST de la malla hija es en promedio  $0.1^{\circ}\text{C}$  mayor que el de la malla madre (Figura 17a y b).



**Figura 17.** Promedios temporales (del 1 de agosto del 2022 al 27 de julio de 2023) de RMSE de la temperatura superficial del mar de (a) malla madre y (b) malla hija y BIAS de la temperatura superficial del mar de (c) malla madre y (d) malla hija. Dado que el BIAS se definió como la diferencia entre los datos del modelo y los observados, los valores positivos (negativos) indican que el modelo presenta una SST mayor (menor) que las observaciones.

### 3.1.3. Programa Global de Derivadores de la NOAA

Con el objetivo de validar las salidas del modelo lagrangiano OpenDrift y evaluar el factor de arrastre del viento óptimo en las velocidades de advección de las partículas modeladas, se compararon las trayectorias de boyas del Programa Global de Derivadores de la NOAA con las de las partículas simuladas en OpenDrift. Se utilizaron los datos de 7 boyas dentro del área de estudio en el periodo de simulación. De éstas, 2 tenían lastre y el resto no.

Para configurar las simulaciones en OpenDrift, se sembraron 11 partículas en la superficie cada 24 horas a lo largo de las trayectorias observadas de las boyas, permitiendo que evolucionaran durante 24 horas. A cada una de las partículas se le asignó un factor de arrastre del viento entre 0 y 5%, con incrementos de 0.5%. De esta manera, las partículas fueron advectadas con la velocidad determinada por las corrientes oceánicas superficiales más el efecto del viento dado por la velocidad del viento escalado por dicho factor. Las simulaciones se alimentaron con las corrientes superficiales diarias de ROMS de las mallas madre e hija y vientos cada 3 horas de GFS. Las partículas se dejaron evolucionar por 24 horas. Con las posiciones resultantes se calculó el medidor de desempeño de Liu-Weisberg (Liu & Weisberg, 2011). Este medidor se obtiene con base en la separación acumulativa Lagrangiana normalizada ( $s$ ):

$$s = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{i=1}^N l_{oi}} \quad (4)$$

Donde  $d_i$  es la separación entre la posición modelada y observada en el registro  $i$ ,  $l_{oi}$  es la longitud de la trayectoria observada y  $N$  es el número total de registros. Con esta separación  $s$  se define el medidor de desempeño de Liu-Weisberg  $ss$  para las trayectorias modeladas:

$$ss = \begin{cases} 1 - \frac{s}{n}, & (s \leq n) \\ 0, & (s > n) \end{cases} \quad (5)$$

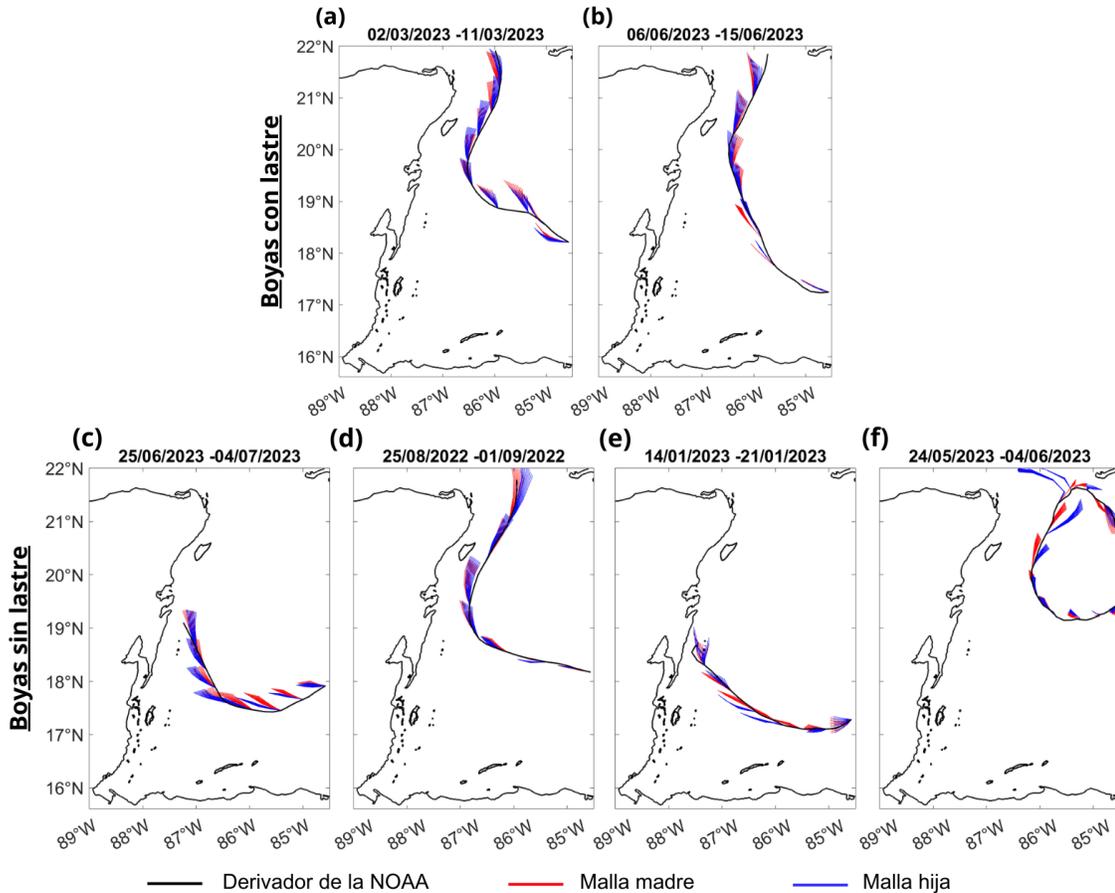
Donde  $n$  es un umbral de tolerancia. En este trabajo se definió que  $n = 1$ , de forma que  $ss = 1$  cuando la trayectoria modelada se ajusta perfectamente a la observada y 0 cuando la separación acumulativa es mayor que la longitud acumulativa de la trayectoria observada (Dagestad & Röhrs, 2019).

En la Figura 18 se muestran las trayectorias de las partículas modeladas para las boyas con lastre (a-b) y cuatro de las boyas sin lastre (c-f). En las Figuras 18 a, b, c, d y e, las boyas son transportadas hacia el Golfo de México por la corriente de Caimán/Yucatán, mientras que en la Figura 18f la boya está atrapada en un remolino anticiclónico al suroeste de Cuba. En general, las partículas reproducen adecuadamente el movimiento de las boyas.

En la Figura 19a se muestran los resultados de la boya sin lastre que cruzó la zona de estudio del 31 de octubre al 15 de noviembre del 2022. Durante este periodo el huracán Lisa atravesó el dominio. Lisa se formó el 30 de octubre del 2022 en el mar Caribe central a partir de una baja presión con probabilidad para desarrollo ciclónico y comenzó a desplazarse hacia el oeste-noroeste. El 2 de noviembre, a 200 km al sureste de Quintana Roo fue catalogado como huracán de categoría 1 (escala Saffir-Simpson). El 3 de noviembre se degradó a tormenta tropical sobre Campeche (Servicio Meteorológico Nacional, 2022). Se observó que al utilizar las corrientes diarias de ROMS y forzar al OpenDirft con vientos de GFS como en los casos anteriores, las trayectorias de las partículas no se asemejaban a la de la boya, ya que mientras la boya se movía con dirección hacia el norte las partículas lo hacían hacia el sur (Figura 19a).

Para evaluar si los datos de GFS reproducían correctamente el paso del huracán Lisa, se compararon los campos de viento promedio del reanálisis de ERA5 (Figura 20a-c) con los del modelo GFS (Figura 20d-f). Se observó que los campos de vientos de GFS y ERA5 no coincidían en dirección ni intensidad, además el centro del huracán se encontraba más al sur y desfasado en tiempo con los datos de GFS. Por esta razón, en el caso de esta boya se realizó la simulación de OpenDrift con vientos cada 3 horas de

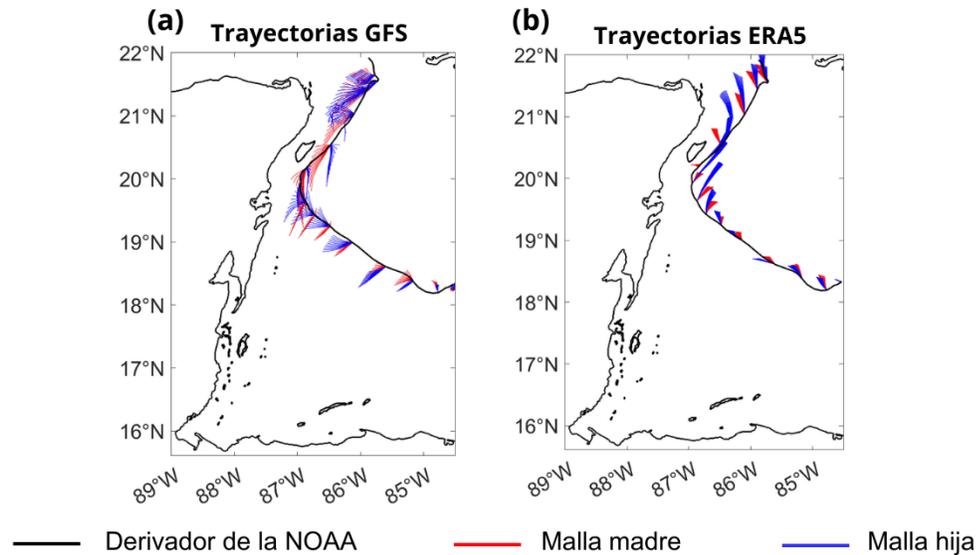
ERA5 y corrientes de ROMS forzadas con ERA5. Las trayectorias resultantes se muestran en la Figura 19b. Al utilizar los campos de viento de ERA5 se observa que las trayectorias de las partículas logran capturar el patrón de movimiento de la boya (Figura 19b), al contrario de los vientos de GFS.



**Figura 18.** Trayectorias de las partículas virtuales y las boyas con lastre (a, b) y sin lastre (c, d, e, f). Las curvas negras indican la trayectoria de las boyas, mientras que las rojas y azules las de las partículas virtuales de las mallas madre e hija, respectivamente. Las partículas se sembraron en la superficie cada 24 horas a lo largo de las trayectorias observadas de las boyas, permitiendo que evolucionaran durante 24 horas. A cada una de las partículas se le asignó un factor de arrastre del viento entre 0 y 5 %, con incrementos de 0.5 % (11 partículas en total para cada malla).

Lara-Hernández y colaboradores (2024) compararon el porcentaje de varamientos en las costas del Caribe mexicano utilizando vientos de los reanálisis ERA5 y CFSv2. Observaron que, al usar CFSv2, se varaban un 2 % más de partículas en comparación con ERA5, lo cual atribuyeron a que los vientos de CFSv2 son más intensos que los de ERA5. Esto se debe a que los vientos alisios más fuertes contribuyen a un mayor número de varamientos. Si bien los resultados de Lara-Hernández indican una pequeña diferencia según la fuente de datos de viento utilizada, nuestros resultados sugieren que puede haber una diferencia considerable dependiendo de la fuente de datos de viento, especialmente al comparar reanálisis como ERA5 con sistemas de pronóstico como el GFS. Además, en eventos extremos como los huracanes, los

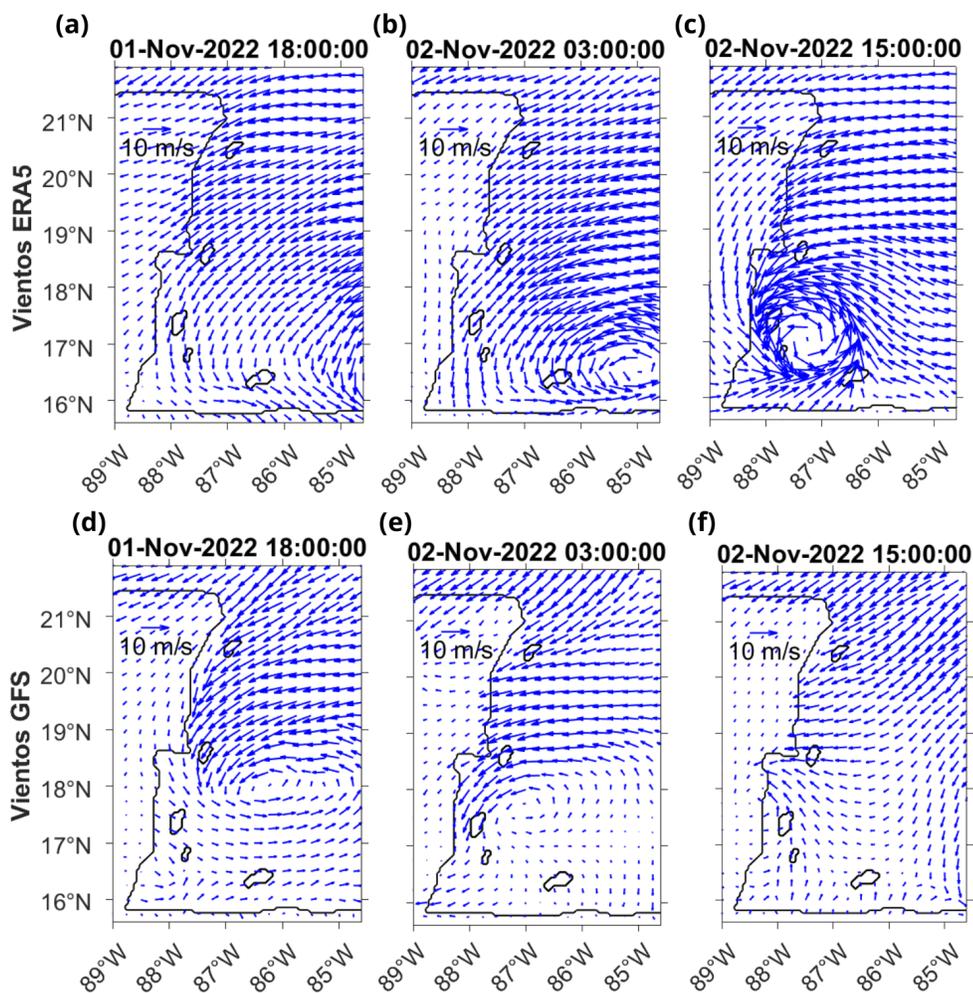
vientos pronosticados pueden no reflejar adecuadamente las condiciones reales, lo que podría afectar significativamente las trayectorias modeladas.



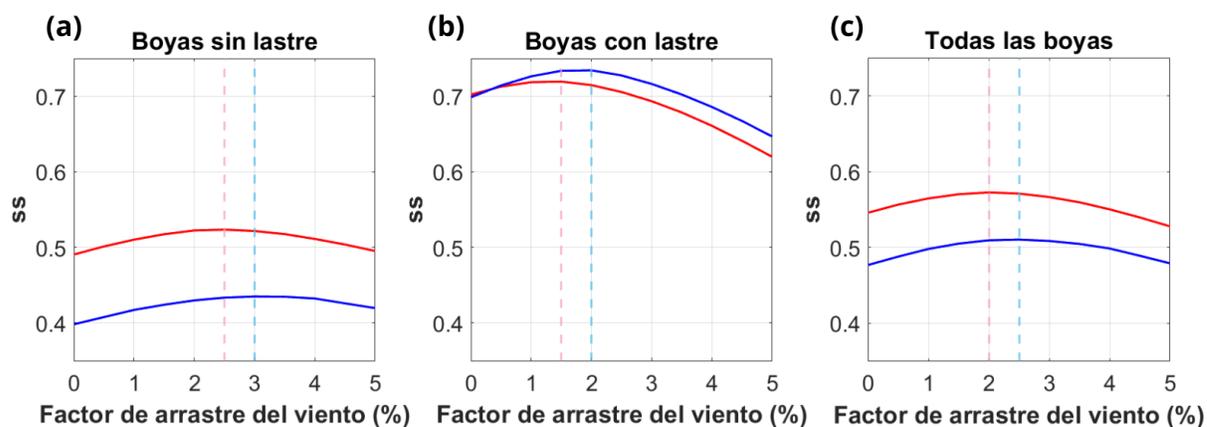
**Figura 19.** Trayectorias de las partículas virtuales y la boya sin lastre en el periodo del 31 de octubre al 15 de noviembre del 2022 forzadas con vientos de GFS (a) y ERA5 (b). Las partículas se sembraron en la superficie cada 24 horas a lo largo de las trayectorias observadas de las boyas, permitiendo que evolucionaran durante 24 horas. A cada una de las partículas se le asignó un factor de arrastre del viento entre 0 y 5 %, con incrementos de 0.5 % (11 partículas en total para cada malla).

Finalmente, se calcularon los valores promedio del medidor de desempeño de Liu-Weisberg ( $ss$ ) para cada factor de arrastre del viento en las soluciones de ambas mallas. Los resultados se muestran en la Figura 21. Al considerar las boyas sin lastre (Figura 21a) la malla madre tiene un mejor desempeño que la hija, siendo los factores de arrastre del viento óptimos de 2.5 % y 3 % para las mallas madre e hija, respectivamente. Estudios previos han sugerido que el comportamiento de las boyas sin lastre es similar al de las matas de sargazo (van Sebille et al., 2021; Beron-Vera et al., 2022). Además, los factores de arrastre del viento reportados para el modelado de sargazo varían entre 0.5 % y 3 % (Putman et al., 2018, 2020; Johns et al., 2020; Berline et al., 2020; Johnson et al., 2021; Marsh et al., 2021; Podlejski et al., 2023; Lara-Hernández et al., 2024). Los valores de factor de arrastre del viento que maximizaron el desempeño de cada malla se encuentran dentro de este rango.

En el caso de las boyas con lastre (Figura 21b) la malla hija tiene un mejor desempeño que la madre, y los factores de arrastre del viento óptimos son de 1.5 % para la malla madre y 2 % para la hija. Al considerar todas las boyas en el análisis, la malla madre tiene un mejor desempeño que la hija y los factores de arrastre del viento óptimos son de 2 % y 2.5 % para las mallas madre e hija, respectivamente.



**Figura 20.** Campos de viento de ERA5 (a, b, c) y GFS (d, e, f) durante el paso del huracán Lisa sobre el área de estudio. En el caso de ERA5 el ciclón ingresa al dominio el 2 de noviembre en una latitud alrededor de los 16.5°N (b). Por otro lado, los campos de GFS muestran su ingreso desde el 1 de noviembre a una latitud de aproximadamente 18°N (d).



**Figura 21.** Medidor de desempeño de Liu-Weisberg ( $ss$ ) en función del factor de arrastre de viento para las (a) boyas sin lastre, (b) boyas con lastre y (c) todas las boyas. Las curvas rojas y azules representan los valores de  $ss$  de las mallas madre e hija, respectivamente. Las líneas punteadas indican el factor de arrastre del viento en el que se alcanzó el valor máximo de  $ss$ , en rosa para la malla madre y azul para la hija.

Al comparar los factores de arrastre del viento de cada malla para las boyas con lastre y sin lastre, se observa que los factores de arrastre en el caso de las boyas con lastre son menores que los de las boyas sin lastre. Esto era lo esperado, ya que el lastre atenúa el efecto del arrastre del viento en el derivador (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024). Además, al considerar todas las boyas, tanto con como sin lastre, los factores de arrastre del viento que maximizan el desempeño son mayores en la malla hija que en la malla madre. Esto podría deberse a que las corrientes oceánicas son más intensas en la malla hija que en la madre.

### 3.2. Casos de estudio

Con el objetivo de evaluar la distribución y los arribazones de sargazo en las costas del Caribe mexicano, se seleccionaron cuatro casos de estudio basados en las condiciones atmosféricas y la circulación oceánica de la zona de estudio. Los casos considerados fueron los siguientes: “Promedio” (7 a 17 de agosto de 2022), “Rossby” (30 de marzo a 9 de abril de 2023), “Anticiclón” (10 a 20 de junio de 2023) y “Huracán” (1 a 11 de noviembre de 2022). Es importante destacar que cada caso tiene una duración de diez días, definida con base en los tiempos de arribo observados del sargazo a Banco Chinchorro. Este sargazo, localizado aproximadamente a 160 km de la costa (alrededor de 86.5°W), llegaba a la playa en un período de entre 7 y 8 días (Lara-Hernández et al., 2024).

Las simulaciones se realizaron con el modelo OpenDrift, configurado con los campos de vientos y corrientes descritos a continuación. Para los casos “Promedio”, “Rossby” y “Anticiclón” se emplearon los campos de viento de GFS y las corrientes oceánicas generadas con el modelo ROMS para ambas mallas, forzadas con estos mismos datos.

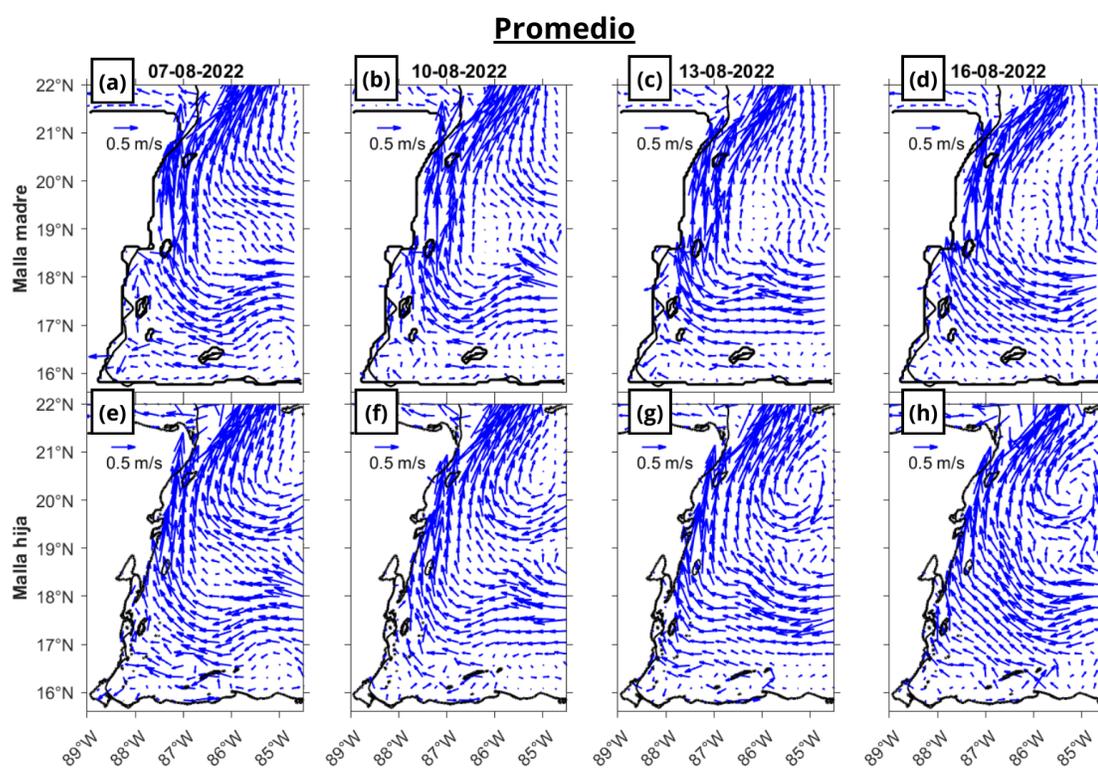
En cambio, en el caso “Huracán”, se utilizaron los vientos del reanálisis ERA5 y las corrientes oceánicas correspondientes generadas con el modelo ROMS, ya que los datos de GFS no representaron adecuadamente las condiciones atmosféricas de este periodo (véase **Sección 3.1.3**). A continuación, se describen las condiciones oceánicas y atmosféricas de cada caso. En la Tabla 2 se resumen las características principales de cada escenario.

El caso “Promedio” (7 a 17 de agosto de 2022) recibe este nombre porque refleja condiciones oceánicas similares a las promedio del año de simulación. En este caso, en la malla madre (Figura 22a-d), el núcleo de la corriente de Caimán ingresa al área de estudio a una latitud aproximada de 17.5°N, choca con la

península de Yucatán a la altura de Banco Chinchorro y se intensifica hacia el canal de Yucatán. Además, se identifica una región con bajas magnitudes de la corriente alrededor de  $19^{\circ}\text{N}$  y  $86^{\circ}\text{W}$ , característica que no está presente en la malla hija.

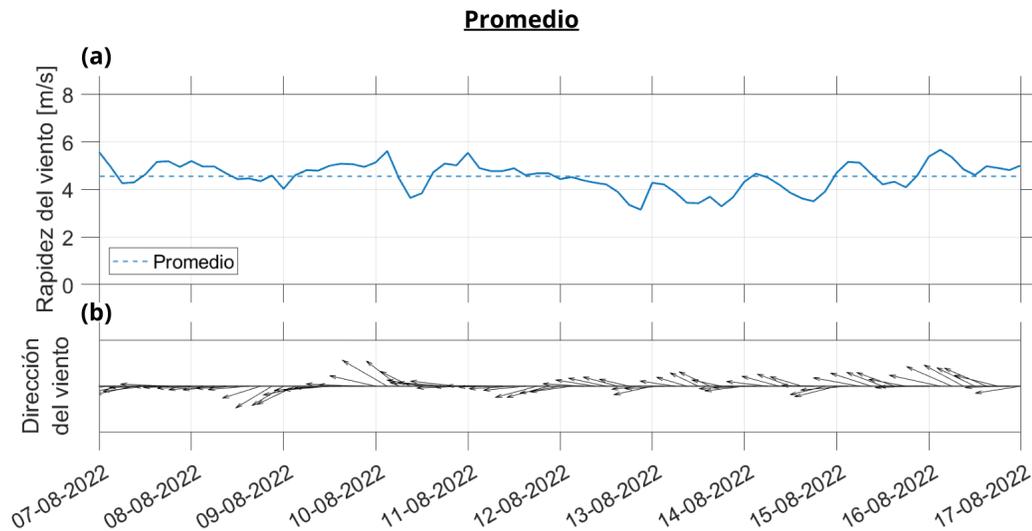
**Tabla 2.** Características principales de los casos de estudio.

Caso	Periodo	Característica	Forzamiento atmosférico
Promedio	7 a 17 de agosto de 2022	Condiciones similares a las promedio del año de simulación	GFS
Rossby	30 de marzo a 9 de abril del 2023	Alto número de Rossby	GFS
Anticiclón	10 a 20 de junio de 2023	Anticiclón intenso al sur de Cuba	GFS
Huracán	1 a 11 de noviembre de 2022	Paso del huracán Lisa	ERA5



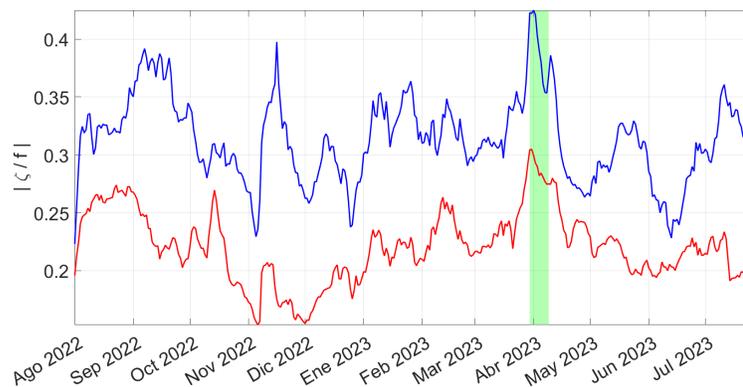
**Figura 22.** Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 7 (a/e), 10 (b/f), 13 (c/g) y 16 (d/h) de agosto de 2022.

Por otro lado, en la malla hija (Figura 22e-h), la corriente de Caimán ingresa a una latitud aproximada de  $17.8^{\circ}\text{N}$ , impactando la península al sur de Banco Chinchorro. Asimismo, se observa un anticiclón con centro en  $20.5^{\circ}\text{N}$  y  $85.5^{\circ}\text{W}$ , el cual no se presenta en la malla madre. La rapidez promedio del viento en el área de estudio es de  $4.54\text{ m/s}$  (Figura 23a), con una dirección predominante del este/sureste (Figura 23b).



**Figura 23.** Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso “Promedio” (7 al 17 de agosto de 2022).

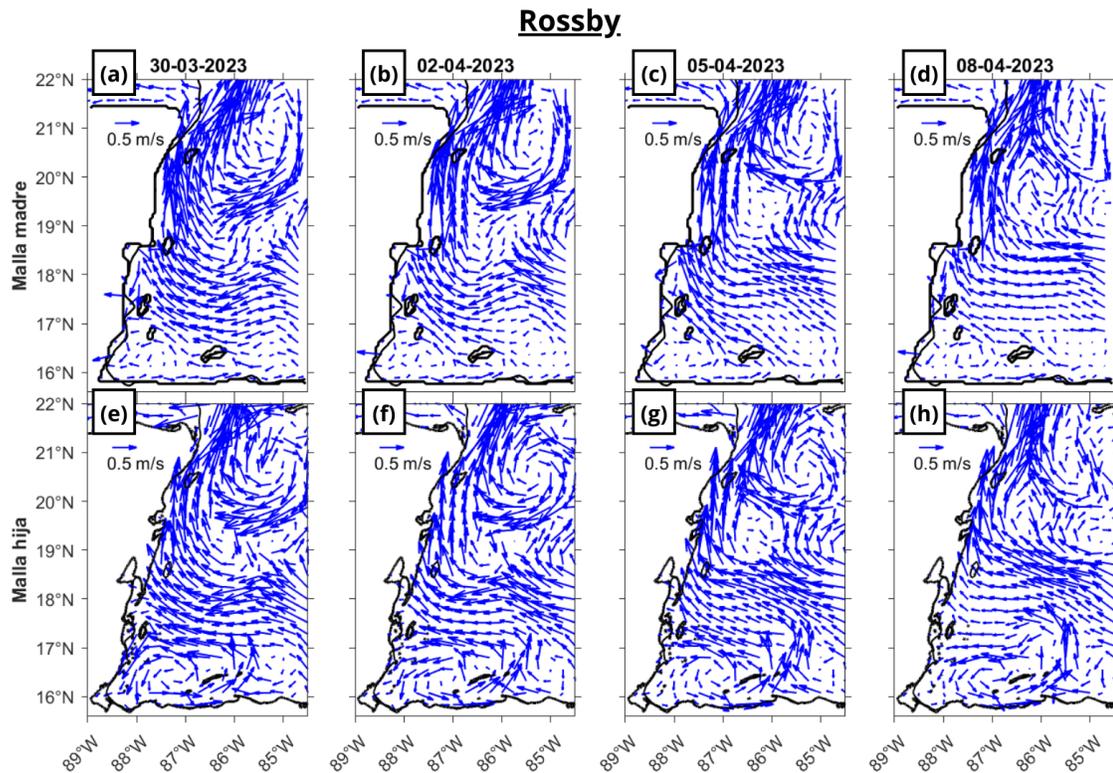
El caso “Rossby” (30 de marzo a 9 de abril del 2023) fue seleccionado debido a que presenta un alto número de Rossby ( $Ro$ ) en la serie temporal del año de simulación (Figura 24). El número de Rossby es un parámetro adimensional que compara la aceleración de un fluido con la aceleración debida a la rotación de la Tierra (Talley et al., 2011). Para fenómenos de pequeña escala y rápidos, el número de Rossby es alto ( $Ro \gg 1$ ) y la rotación de la Tierra es despreciable. En cambio, para fenómenos de mayor escala y lentos, el número de Rossby es pequeño ( $Ro \ll 1$ ), indicando que el fenómeno está dominado por la rotación de la Tierra. El número de Rossby se calculó como el cociente entre la vorticidad relativa del fluido ( $\zeta$ ) y la vorticidad planetaria ( $f$ ).



**Figura 24.** Series temporales del valor absoluto del número de Rossby ( $|\zeta/f|$ ) de las mallas madre (rojo) e hija (azul). La franja verde indica el periodo del caso “Rossby”.

En este caso, en ambas mallas se observa un remolino anticiclónico con centro en  $21^\circ\text{N}$  y  $85.2^\circ\text{W}$  en

la malla madre (Figura 25a-d), y en 20.5°N y 85.5°W en la malla hija (Figura 25e-h). En ambas, la corriente de Caimán se bifurca en la frontera este del dominio a una latitud cercana a 19°N, con una porción fluyendo hacia el noreste. Asimismo, la corriente de Caimán ingresa al área de estudio a una latitud de aproximadamente 18°N y choca con la península de Yucatán desde la latitud de las Islas Turneffe.

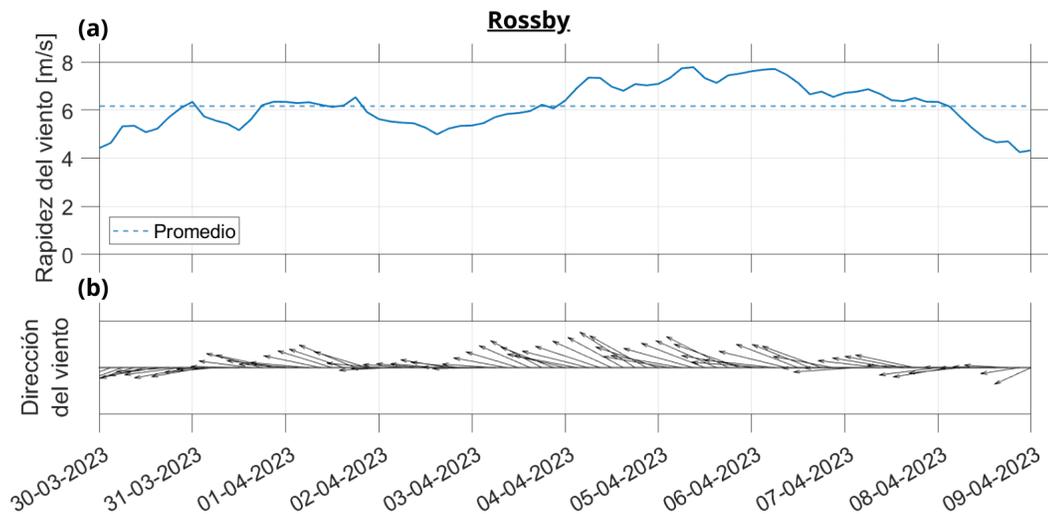


**Figura 25.** Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 30 de marzo (a/e), 2 (b/f), 5 (c/g) y 8 (d/h) de abril de 2023.

En la malla madre, se presenta un remolino ciclónico con centro en 16.5°N y 85.2°W, el cual interactúa con la corriente de Caimán (Figura 25a-d). Además, se observa una corriente hacia el oeste que se origina al este de las Islas de la Bahía. Por otro lado, en la malla hija se observa una circulación ciclónica al sur del dominio, que fluye hacia el este a lo largo de la frontera sur, gira hacia el norte rodeando las Islas de la Bahía y se mueve hacia el oeste hasta alcanzar las Islas Turneffe, donde desvía su trayectoria hacia el sur al encontrarse con la costa oeste del dominio (Figura 25e-h). Esta circulación no está presente en la malla madre. Los vientos tienen una rapidez promedio de 6.16 m/s, con un rango de variación entre 4.1 y 7.9 m/s (Figura 26a). Los vientos tienen una dirección predominante del este/sureste (Figura 26b).

El caso “Anticiclón” (10 a 20 de junio del 2023) se caracteriza por presentar un anticiclón al sur de Cuba, con su centro ubicado entre 19.5° y 20°N, y 85°W (Figura 27a-d, e-h). En ambas mallas, el núcleo

de la corriente de Caimán ingresa al área de estudio en un rango de latitudes entre  $17^{\circ}\text{N}$  y  $17.5^{\circ}\text{N}$ . En la malla madre, la corriente de Caimán impacta con la península de Yucatán a partir de la latitud a la que se encuentran las Islas Turneffe (Figura 27a-d), mientras que en la malla hija lo hace a la altura de la Reserva de Sian Ka'an el 10 de junio (Figura 27e) y de Banco Chinchorro los días 13, 16 y 19 de junio (Figura 27f-h). El 10 de junio, en la malla hija se observa una circulación que rodea Banco Chinchorro y desvía la corriente de Caimán hacia el norte (Figura 27e). La rapidez promedio del viento es de  $5.58\text{ m/s}$ , con un rango de variación entre  $1.8$  y  $7\text{ m/s}$  (Figura 28a). La dirección predominante de los vientos es del sureste (Figura 28b).

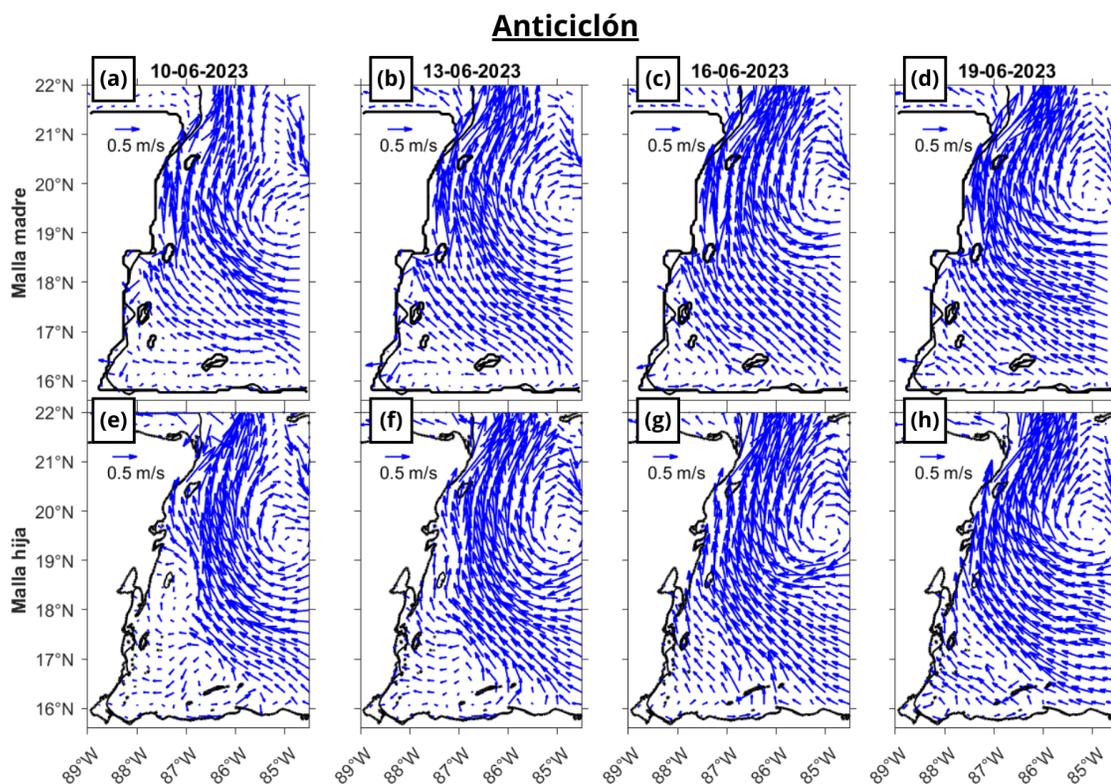


**Figura 26.** Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso "Rossby" (30 de marzo al 9 de abril de 2023).

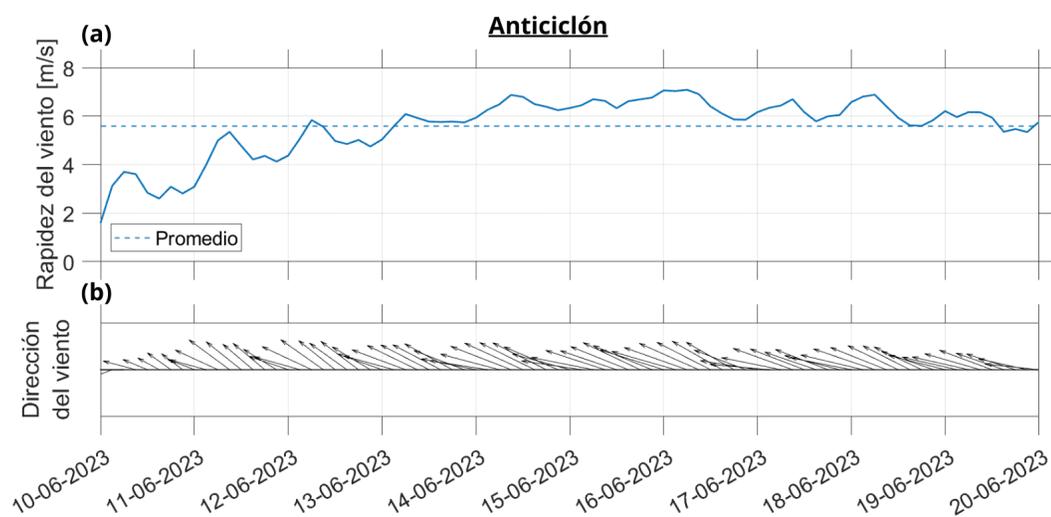
El caso "Huracán" (1 a 11 de noviembre de 2022) se caracteriza por el paso del huracán Lisa sobre la zona de estudio. En este caso, en ambas mallas, en los días 1, 4 y 7 de noviembre, se observa una corriente hacia el golfo de México que ingresa por la frontera este del dominio a una latitud aproximada de  $20.5^{\circ}\text{N}$  (Figura 29a-c, e-g). En la malla madre, el núcleo de la corriente de Caimán ingresa al área de estudio en un rango de latitudes de  $17^{\circ}\text{N}$  a  $17.3^{\circ}\text{N}$  y colisiona con la península de Yucatán a la altura de Banco Chinchorro (Figura 29a-d). De manera similar, en la malla hija, el núcleo de la corriente de Caimán ingresa al dominio a una latitud aproximada de  $17^{\circ}\text{N}$  y choca con la península de Yucatán a la altura de Banco Chinchorro (Figura 29e-h).

En la malla madre, se presenta un remolino ciclónico con centro en  $17.5^{\circ}\text{N}$  y  $86.5^{\circ}\text{W}$ , el cual interactúa con la corriente de Caimán, desplazándola hacia el norte (Figura 29a-d). En la malla hija no se observa dicho remolino; sin embargo, se presenta un remolino anticiclónico con centro en  $17^{\circ}\text{N}$  y  $87^{\circ}\text{W}$  (Figura

29e-h). En la malla hija, las corrientes a lo largo de la frontera sur del área de estudio son más intensas que en la malla madre (Figura 29e-h).



**Figura 27.** Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 10 (a/e), 13 (b/f), 16 (c/g) y 19 (d/h) de junio de 2023.

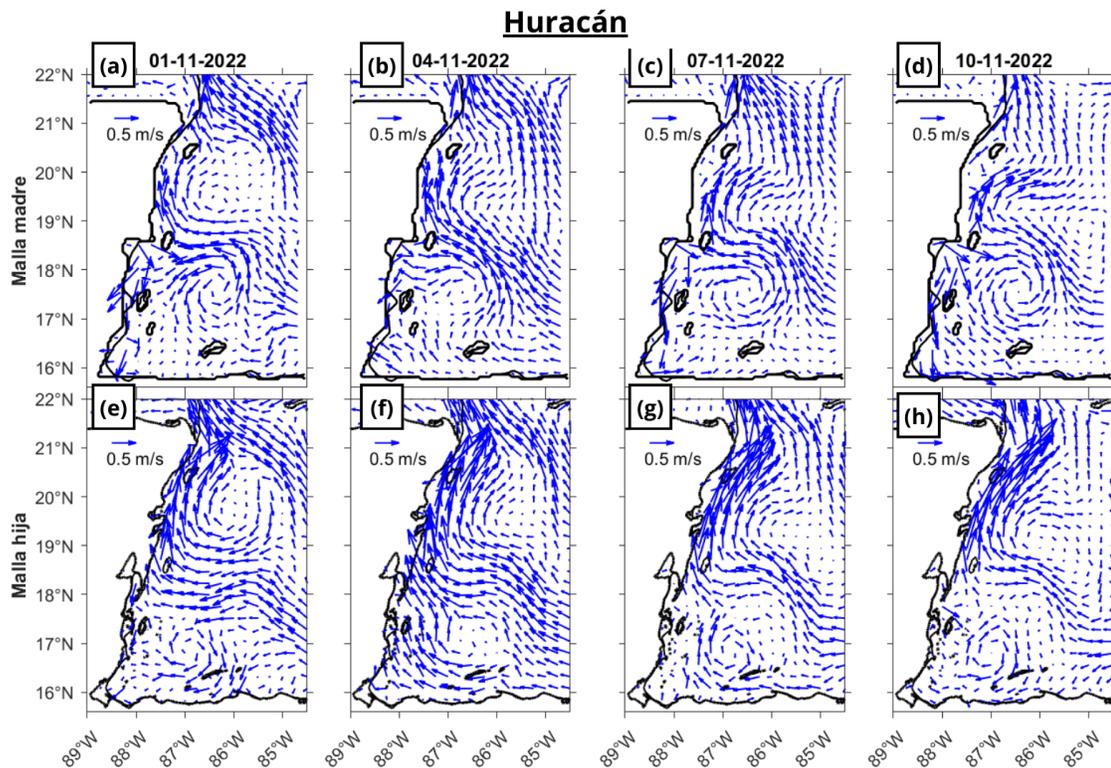


**Figura 28.** Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso “Anticiclón” (10 al 20 de junio de 2023).

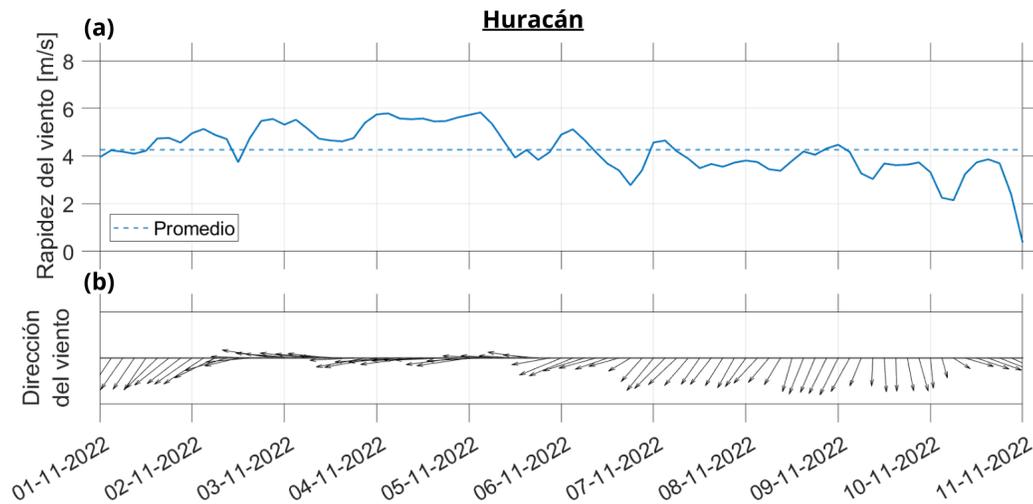
Cabe destacar que la intensidad de la corriente de Yucatán alrededor del canal de Cozumel es mucho mayor en la malla hija que en la malla madre. En la malla madre, la corriente de Yucatán forma un meandro, moviéndose hacia el este de Cozumel y luego hacia el golfo de México (Figura 29a-d). En cambio, en la malla hija, la corriente de Yucatán no se desvía hacia el este en Cozumel, sino que se desplaza hacia el norte a lo largo de la costa, intensificándose en el canal de Cozumel (Figura 29e-h).

En la malla hija, el 1 de noviembre se observa un remolino anticiclónico con centro en  $19.5^{\circ}\text{N}$  y  $86^{\circ}\text{W}$  (Figura 29e), que se desplaza hacia el sureste en los días posteriores (Figura 29f-h). En la malla madre, el 1 de noviembre se observa un remolino anticiclónico con centro en  $19.5^{\circ}\text{N}$  y  $86.5^{\circ}\text{W}$ , que en los días siguientes ya no se aprecia (Figura 29a). La falta de desvío de la corriente en Cozumel en la malla hija podría deberse a la presencia del remolino anticiclónico mencionado anteriormente.

Los vientos tienen una rapidez promedio de  $4.26\text{ m/s}$ , con un rango que varía de  $0.5$  a  $5.9\text{ m/s}$  (Figura 30a). Del 1 al 2 de noviembre, los vientos soplan del noreste; del 2 al 6 de noviembre, del este; del 6 al 10 de noviembre, del norte/noreste; y del 10 al 11 de noviembre, del noroeste (Figura 30b).



**Figura 29.** Campos de corrientes oceánicas simulados con el modelo ROMS para la (a-d) malla madre y la (e-h) malla hija, correspondientes a los días 1 (a/e), 4 (b/f), 7 (c/g) y 11 (d/h) de noviembre de 2022.



**Figura 30.** Serie temporal de la (a) rapidez y (b) dirección del viento en el área de estudio durante el período correspondiente al caso “Huracán” (1 al 11 de noviembre de 2022).

### 3.3. Configuración de las simulaciones

Con el fin de cuantificar los arribazones de sargazo en el Caribe mexicano y evaluar las posibles diferencias entre ambas mallas, se utilizó el modelo OpenDrift. Se analizaron cada uno de los casos descritos en la **Sección 3.2**. El modelo fue configurado empleando campos de viento del modelo GFS (para los casos “Promedio”, “Rossby” y “Anticiclón”) y del reanálisis ERA5 (para el caso “Huracán”) con una frecuencia de actualización de 3 horas. Para las corrientes oceánicas, se utilizaron las salidas diarias de las corrientes superficiales de ROMS correspondientes a las mallas madre e hija, forzadas con GFS (para los casos “Promedio”, “Rossby” y “Anticiclón”) y con ERA5 (para el caso “Huracán”).

Para simular el sargazo, se advectaron 9000 partículas lagrangianas desde una posición inicial a lo largo de una línea meridional ubicada en 85°W, que se extiende desde los 16°N hasta los 22°N. Las partículas se sembraron distribuidas equiespaciadamente en la superficie, sin asignarles flotabilidad variable, lo que evitó su hundimiento. Adicionalmente, se aplicó un factor de arrastre del viento del 2.5% en las velocidades de advección. La elección de este valor se basó en el factor para el cual el medidor de desempeño de Liu-Weisberg fue máximo al considerar boyas sin lastre (**Sección 3.1.3**), dado que se ha sugerido que el movimiento de las balsas de sargazo es similar al de los derivadores sin lastre (van Sebille et al., 2021; Beron-Vera et al., 2022).

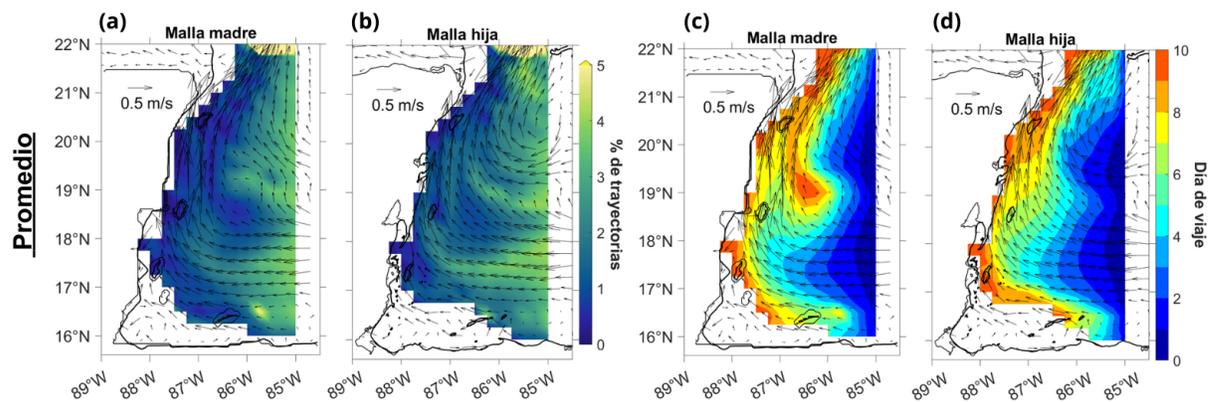
Las partículas se advectaron durante un periodo de 10 días, empleando un paso de tiempo de 120 segundos. Las salidas se registraron cada 30 minutos para garantizar un seguimiento detallado de las

trayectorias. Este enfoque permitió modelar con precisión el movimiento de las partículas bajo la influencia combinada de las corrientes oceánicas superficiales y el viento.

En las siguientes secciones se presentan los resultados calculados a partir de las trayectorias generadas. En la **Sección 3.4**, se comparan los patrones de distribución de las partículas en ambas mallas mediante el análisis del porcentaje de trayectorias, así como del tiempo de viaje promedio de las partículas desde su posición inicial, en celdas de una cuadrícula de  $1/4^\circ$ . En la **Sección 3.5** se compara la distribución espacial de los arribos de partículas en la costa y, finalmente, en la **Sección 3.6** se analizan los tiempos de arribo a la costa.

### 3.4. Porcentaje de trayectorias y tiempo de viaje

Para comparar los patrones de distribución de las partículas entre ambas mallas, se utilizaron las trayectorias generadas en OpenDrift. En cada celda de una cuadrícula de  $1/4^\circ$  (aproximadamente 25 km), se calculó el tiempo de viaje promedio (el tiempo que la partícula llevaba viajando al cruzar la celda) y el promedio del porcentaje de trayectorias (relativo al número total de partículas) que atravesaron cada celda en cada paso de tiempo. A continuación, se presentan los resultados para cada caso analizado.

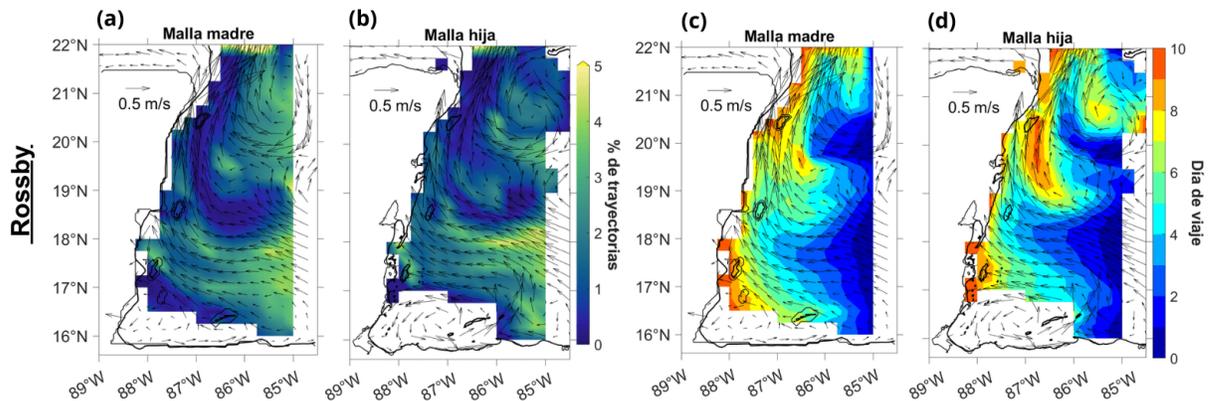


**Figura 31.** Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Promedio”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Promedio”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de  $1/4^\circ$ . Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis.

En el caso “Promedio”, ambas mallas muestran que las regiones con mayor porcentaje de trayectorias se localizan en la porción este del canal de Yucatán (superior al 5%), sobre el núcleo de la corriente de

Caimán (alrededor del 4 %) y al sur de Cuba (alrededor del 4 %; Figura 31a, b). A lo largo de la costa, desde las Islas Turneffe hacia el norte, el porcentaje de trayectorias es bajo (menor al 1 %). Además, en la malla madre se observa un porcentaje elevado de trayectorias (superior al 5 %) al este de las Islas de la Bahía, lo cual no se aprecia en la malla hija.

En cuanto a los tiempos de viaje, ambas mallas presentan llegadas similares a las Islas Turneffe (a partir del día 8), al Banco Chinchorro (a partir del día 6), a Cozumel (a partir del día 8) y al oeste y este del canal de Yucatán (a partir de los días 9 y 2, respectivamente; Figura 31c, d). Los tiempos de viaje hacia las Islas de la Bahía son menores en la malla madre en comparación con la malla hija, llegando un día antes. Además, en la malla madre, al suroeste de Cozumel, se identifica una región de estancamiento, característica que no se observa en la malla hija.



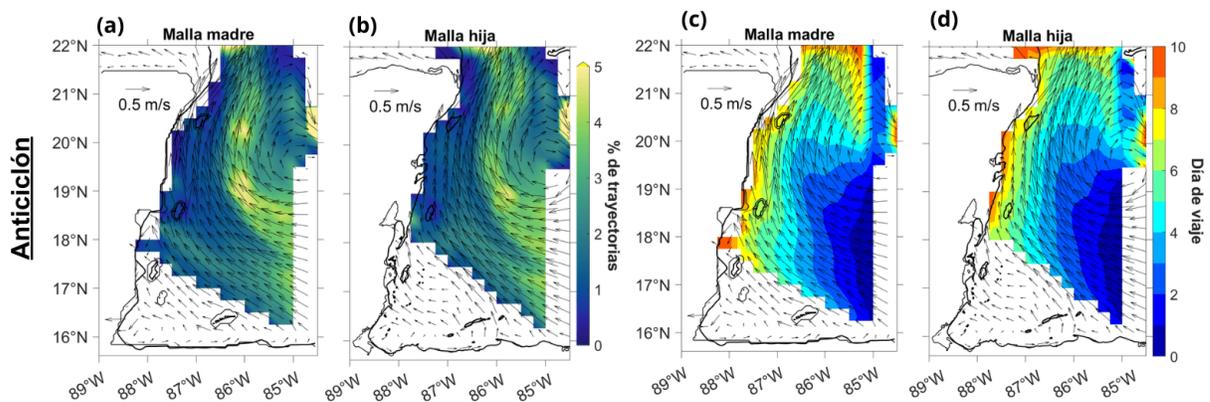
**Figura 32.** Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Rossby”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Rossby”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de  $1/4^\circ$ . Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis.

En el caso “Rossby”, ambas mallas muestran que las regiones con el porcentaje más alto de trayectorias se ubican en el lado oeste del canal de Yucatán (superior al 5 %), en el anticiclón al sur de Cuba (alrededor del 3-4 %), en la corriente de Caimán (alrededor del 4-5 %) y al este de las Islas de la Bahía (alrededor del 4 %; Figura 32a, b). Por otro lado, se observa un bajo porcentaje de trayectorias (menor al 1 %) en una franja al norte de la corriente de Caimán hacia Cozumel. En la malla hija, las trayectorias se extienden más hacia el norte en comparación con la malla madre.

En cuanto a los tiempos de viaje, en ambas mallas las partículas presentan tiempos de viaje de entre 4 y 8 días dentro del anticiclón ubicado al sur de Cuba (Figura 32c, d). Los tiempos de llegada a las Islas Turneffe son similares en ambas mallas, arribando a partir del día 8. A Cozumel, las partículas

llegan entre los días 7 y 8. Sin embargo, en el caso de Banco Chinchorro, las partículas de la malla hija llegan un día antes que en la malla madre (en la hija a partir del día 4, y en la madre desde el día 5). Además, en la malla hija se observa una región al sureste de Cozumel donde los tiempos de viaje son aproximadamente dos días mayores en comparación con la malla madre. Por último, en la malla hija, el tiempo de viaje es hasta 5 días mayor en el centro del anticiclón que en su periferia.

En el caso “Anticiclón”, en ambas mallas se observa un alto porcentaje (mayor al 5 %) de trayectorias en el lado oeste del canal de Yucatán, en la corriente de Caimán y en el anticiclón al sur de Cuba, particularmente al noreste y suroeste/este (Figura 33a, b). También se observa un porcentaje bajo (menor al 1 %) a lo largo de la costa, desde Banco Chinchorro hasta la altura de Cancún (21°N).



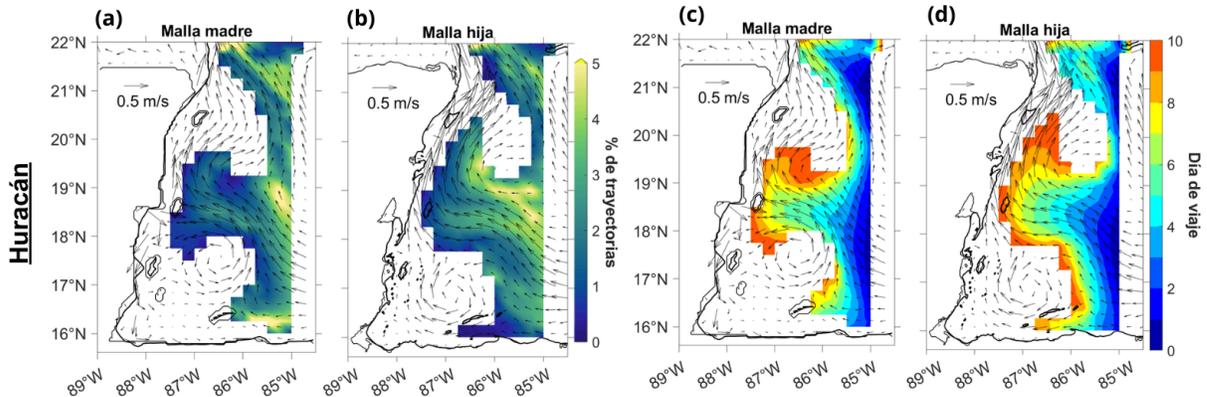
**Figura 33.** Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Anticiclón”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Anticiclón”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de  $1/4^\circ$ . Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis.

En ambas mallas, las partículas cruzan el canal de Yucatán en el día 8 (Figura 33c, d). Además, en la región con un alto porcentaje de trayectorias (superior al 5 %) dentro del anticiclón al sur de Cuba, se registran tiempos de viaje de hasta 10 días, lo que sugiere que las partículas permanecieron recirculando en esa zona. Los tiempos de viaje hacia las costas son similares en ambas mallas; por ejemplo, las partículas llegan a Cozumel a partir del día 7 y a Banco Chinchorro el día 6.

En el caso “Huracán”, en ambas mallas se observa un porcentaje alto de trayectorias en el lado oeste del canal de Yucatán (mayor al 5 %) y sobre el núcleo de la corriente de Caimán (alrededor del 4 %), y porcentajes bajos (menores o iguales a 1 %) cerca de la costa a lo largo de la península de Yucatán (Figura 34a, b). En la malla madre, se presenta un porcentaje alto (mayor al 5 %) al este de las Islas de la Bahía. En la malla hija, se observa un porcentaje alto (mayor al 5 %) de trayectorias en una franja al

norte de la corriente de Caimán (19°N). Además, en esta malla, las trayectorias provenientes de Banco Chinchorro hacia el norte se acercan más a Cozumel que en la malla madre.

En cuanto al tiempo de viaje, en ambas mallas las partículas cruzan el canal de Yucatán a partir del día 5 (Figura 34c, d). Las partículas arribaron a Banco Chinchorro en el día 7 en la malla madre y en el día 8 en la malla hija, y a las Islas de la Bahía en el día 7 en la malla madre y en el día 8 en la malla hija. En ambos sitios, las partículas llegaron un día antes en la malla madre que en la malla hija.



**Figura 34.** Porcentaje de trayectorias en las mallas madre (a) e hija (b) para el caso “Huracán”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (amarillo) representan los porcentajes más bajos (altos) de trayectorias. Día promedio de viaje en las mallas madre (c) e hija (d) para el caso “Huracán”. Las áreas en blanco indican zonas sin registro de trayectorias, mientras que las regiones en azul (naranja) corresponden a los primeros (últimos) días de viaje. Tanto el porcentaje de trayectorias como el día promedio de viaje fueron calculados en cuadros de malla de  $1/4^\circ$ . Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis.

En general, para todos los casos y en ambas mallas, los porcentajes más altos de trayectorias (superiores al 4%) se ubicaron en el canal de Yucatán, en el núcleo de la corriente de Caimán, al sur de Cuba y al este de las Islas de la Bahía. Estas zonas coinciden con la ubicación de estructuras de mesoescala, como la corriente de Caimán, la corriente de Yucatán y la circulación anticiclónica al sur de Cuba. Por otro lado, los porcentajes más bajos (menores al 1%) se localizaron cerca de la costa a lo largo de la península de Yucatán, donde los campos de velocidad suelen ser intensos.

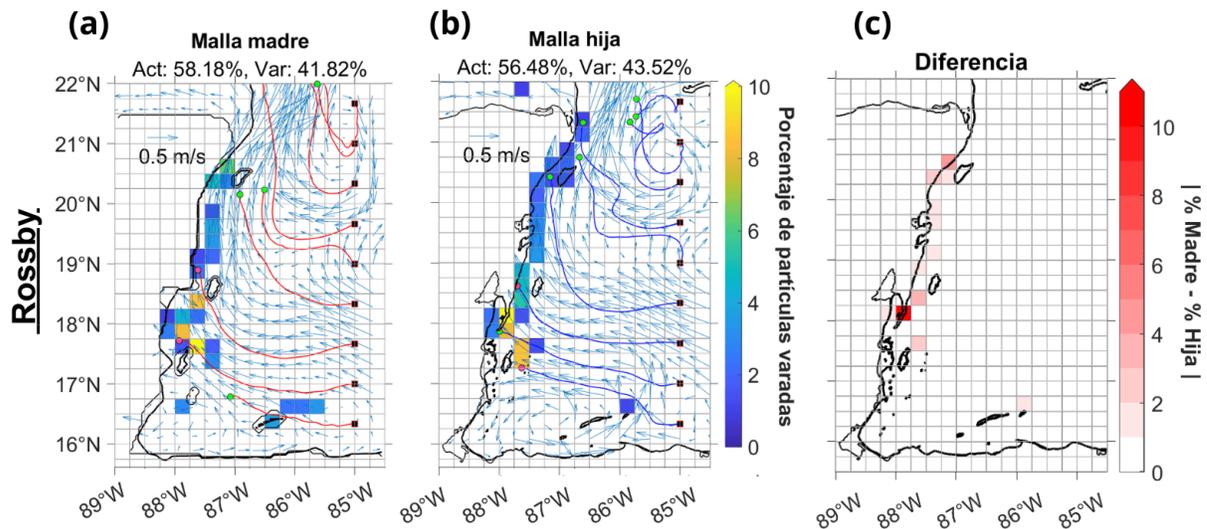
Sobre los tiempos de viaje, en los casos “Rossby” y “Anticiclón” se observaron tiempos de viaje mayores (superiores a dos días) en el anticiclón al sur de Cuba que en sus periferias. En los casos “Promedio” y “Rossby”, las partículas llegaron a las Islas Turneffe alrededor del día 8. A Banco Chinchorro, las partículas arribaron en el día 6 en los casos “Promedio” y “Anticiclón”, en los días 4-5 en el caso “Rossby” y en los días 7-8 en el caso “Huracán”.

En los alrededores de la isla de Cozumel, las partículas llegaron en el día 8 en los casos “Rossby” y

“Promedio”, y en el día 7 en el “Anticiclón”. A las Islas de la Bahía, las partículas arribaron en el día 6 en el caso “Promedio”, en el día 4 en “Rossby”, y en los días 7-8 en “Huracán”. En todos los casos en el canal de Yucatán, los tiempos de viaje aumentan de este a oeste. En el caso “Huracán”, los tiempos de viaje en el canal de Yucatán fueron dos días menores que en el resto de los casos.

### 3.5. Porcentajes de partículas varadas y activas

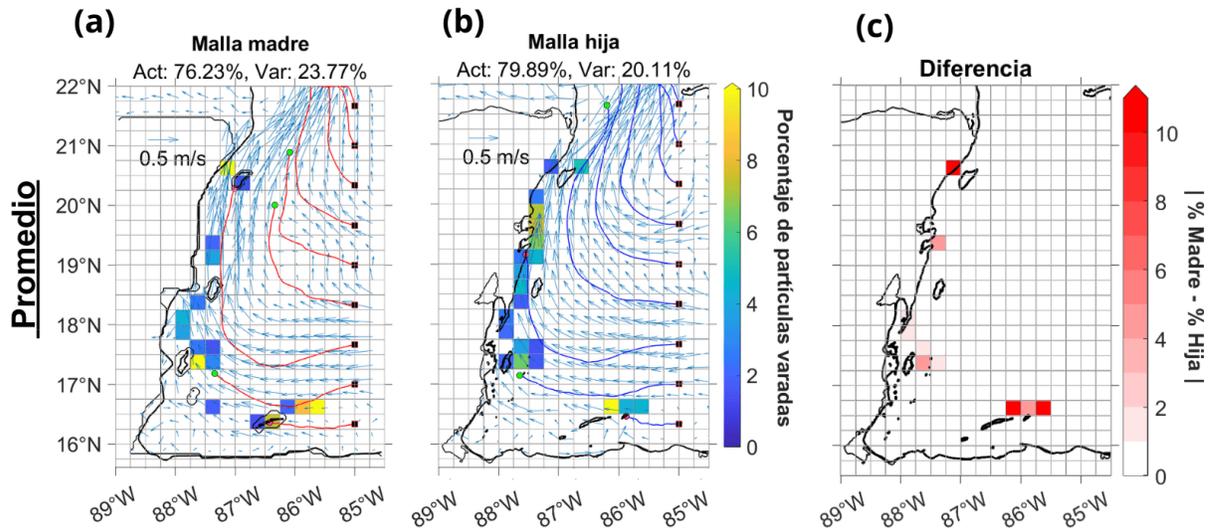
Para comparar la distribución espacial de los varamientos de partículas en la costa entre ambas mallas, así como para identificar las áreas de mayor acumulación, se calculó el porcentaje de partículas varadas y activas al final de cada caso. Además, se determinó el porcentaje de partículas varadas en cada celda de una cuadrícula de  $1/4^\circ$  de resolución, en relación con el total de partículas varadas. Posteriormente, se calculó la diferencia absoluta de los porcentajes de partículas varadas en las celdas de ambas mallas, omitiendo aquellas con diferencias menores al 0.5%. A continuación, se presentan los resultados para cada caso.



**Figura 35.** Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso “Rossby” en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última grafica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5%. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).

En el caso del “Promedio”, en relación con el porcentaje total de varamientos, el 23.77% de las partículas vararon en la malla madre y el 20.11% en la malla hija, lo que representa una diferencia del 3.66% entre ambas mallas. En la malla madre, se observó un mayor porcentaje de varamientos (superior al 10%) al

este de las Islas de la Bahía, en las Islas Turneffe y en el canal de Cozumel (Figura 36a). En la malla hija, el porcentaje más alto de partículas varadas (mayor al 10%) se registró en las Islas de la Bahía, seguido por los varamientos cercanos a la Reserva de Sian Ka'an (entre 6% y 8%) (Figura 36b). Al calcular la diferencia de porcentajes de varamiento entre las cuadrículas de ambas mallas, las mayores discrepancias (mayores al 10%) se encontraron en el canal de Cozumel y las Islas de la Bahía, seguidas (entre 5 y 6%) por la Reserva de Sian Ka'an y las Islas Turneffe (Figura 36c).



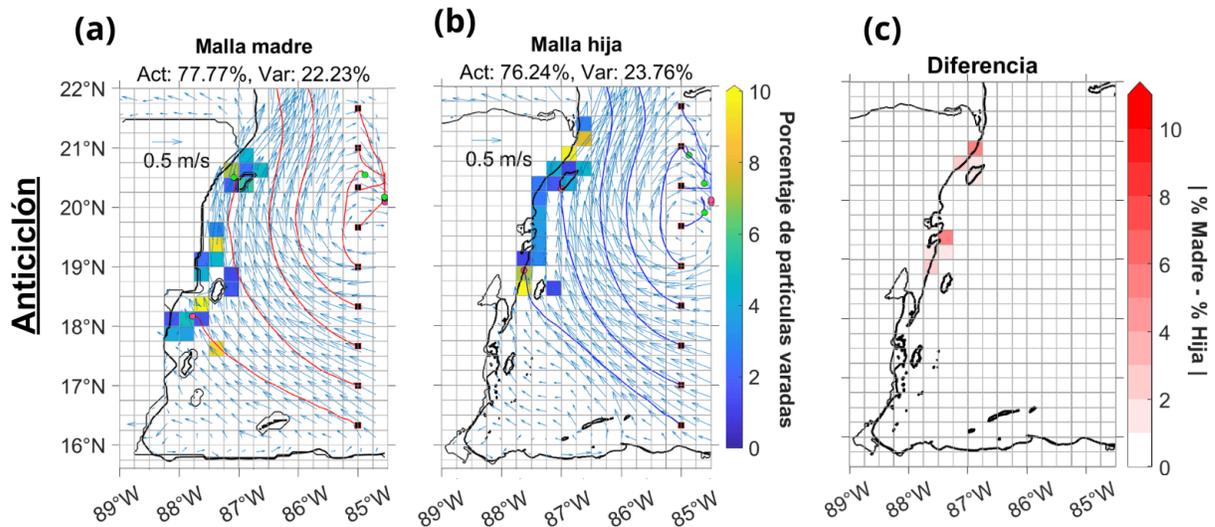
**Figura 36.** Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso “Promedio” en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última grafica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5%. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).

En el caso “Rossby”, el 41.82% de las partículas vararon en la malla madre y el 43.52% en la malla hija, con una diferencia del 1.70%. En ambas mallas, los porcentajes más altos (mayores a 8%) se registraron desde las Islas Turneffe hasta Banco Chinchorro (Figura 35a, b). Además, en la malla hija los varamientos se desplazaron más al norte en comparación con la malla madre. Las mayores diferencias (mayor al 10%) entre ambas mallas se localizaron en la zona de Xcalak y, en menor medida (entre 5 y 6%), en el canal de Cozumel (Figura 35c).

En el caso “Anticiclón”, el 22.23% de las partículas vararon en la malla madre y el 23.76% en la malla hija, con una diferencia del 1.53%. En la malla madre, los porcentajes más altos de varamientos (mayor al 8%) se localizaron en las Islas Turneffe, Xcalak, la Reserva de Sian Ka'an y el canal de Cozumel (Figura 37a). En la malla hija, los valores más altos (mayor al 8%) se registraron al oeste de Banco Chinchorro, en Puerto Morelos y Cancún (Figura 37b). En general, en la malla hija, los varamientos ocurrieron más al norte en comparación con la malla madre. Las mayores diferencias (entre el 5 y 7%)

entre las mallas se observaron en la Reserva de Sian Ka'an y Puerto Morelos (Figura 37c).

En el caso "Huracán", el 23.06 % de las partículas vararon en la malla madre y el 5.88 % en la malla hija, con una diferencia del 17.18 %. En ambas mallas, los porcentajes más altos de varamientos (superiores al 8 %) se registraron en las Islas de la Bahía y en Cuba (Figura 38a, b). Además, en la malla hija, un 6 % de las partículas vararon en Banco Chinchorro. Las diferencias más significativas (mayores al 10 %) se ubicaron en Cuba y, en menor medida (alrededor del 5 %), en Banco Chinchorro (Figura 38c).

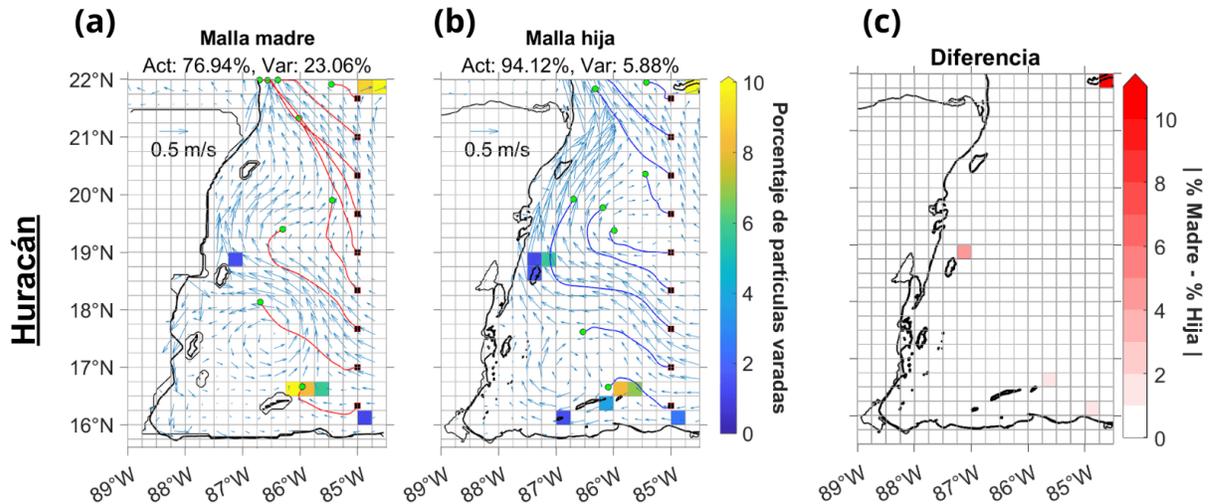


**Figura 37.** Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso "Anticiclón" en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última grafica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).

En resumen, los porcentajes de partículas varadas en la malla madre fueron de 23.77 %, 41.82 %, 22.23 % y 23.06 % para los casos "Promedio", "Rossby", "Anticiclón" y "Huracán", respectivamente. En la malla hija, los porcentajes fueron 20.11 %, 43.52 %, 23.76 % y 5.88 % para los mismos casos. En general, la mayor diferencia en el porcentaje de partículas varadas entre ambas mallas fue del 17.18 %, registrada en el caso "Huracán". En los demás casos, la diferencia fue inferior al 5 % ("Promedio" 3.66 %, "Rossby" 1.70 % y "Anticiclón" 1.53 %). Se observaron diferencias regionales superiores al 10 % entre ambas mallas en los casos "Promedio", "Rossby" y "Huracán", localizándose en el canal de Cozumel, las Islas de la Bahía, Xcalak y Cuba. En los casos "Promedio" y "Huracán", un mayor porcentaje de partículas vararon en la malla madre que en la malla hija, mientras que en los otros dos casos ocurrió lo contrario.

En el caso "Promedio", las zonas con mayor porcentaje de varamientos en ambas mallas fueron las Islas de la Bahía; adicionalmente, en la malla madre se observaron altos porcentajes en las Islas Turneffe y el

canal de Cozumel, mientras que en la malla hija destacaron las áreas de la Reserva de Sian Ka'an. Para el caso "Rossby", los mayores porcentajes de varamientos en ambas mallas se concentraron en las Islas Turneffe y Banco Chinchorro. En el escenario "Anticiclón", los mayores porcentajes se registraron en la malla madre en las Islas Turneffe, Xcalak, la Reserva de Sian Ka'an y el canal de Cozumel, mientras que en la malla hija fueron Banco Chinchorro, Puerto Morelos y Cancún. En el caso "Huracán", se observó un alto porcentaje de varamientos tanto en las Islas de la Bahía como en Cuba para ambas mallas, y específicamente en Banco Chinchorro para la malla hija.



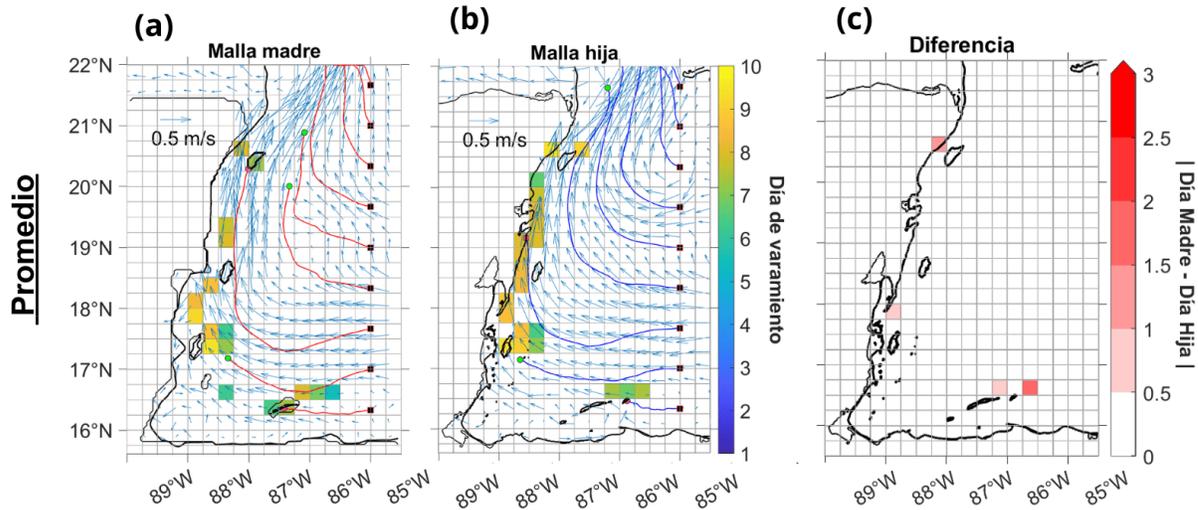
**Figura 38.** Porcentajes de partículas activas (Act) y varadas (Var) para el caso "Huracán" en las mallas madre (a) e hija (b), y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última grafica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).

Las zonas con mayores diferencias en el porcentaje de varamientos (superiores al 10 %) fueron las Islas de la Bahía (caso "Promedio"), Cuba (caso "Huracán"), Xcalak (caso "Rossby") y el canal de Cozumel (caso "Promedio"). Además, en la malla hija, las partículas se vararon de manera más dispersa a lo largo de la costa que en la malla madre.

### 3.6. Tiempos de arribo

Para comparar los tiempos de arribo de las partículas a la costa en ambas mallas, se calculó el día promedio de arribo en cada celda de una cuadrícula con una resolución de  $1/4^\circ$ . Posteriormente, se determinó la diferencia absoluta en los días de arribo entre las dos mallas para cada celda. Utilizando los resultados del análisis presentado en la Sección 3.5, donde se calcularon las diferencias en los porcentajes

de partículas varadas en las celdas de ambas mallas, se excluyeron aquellas celdas con diferencias inferiores al 0.5 %. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada caso.



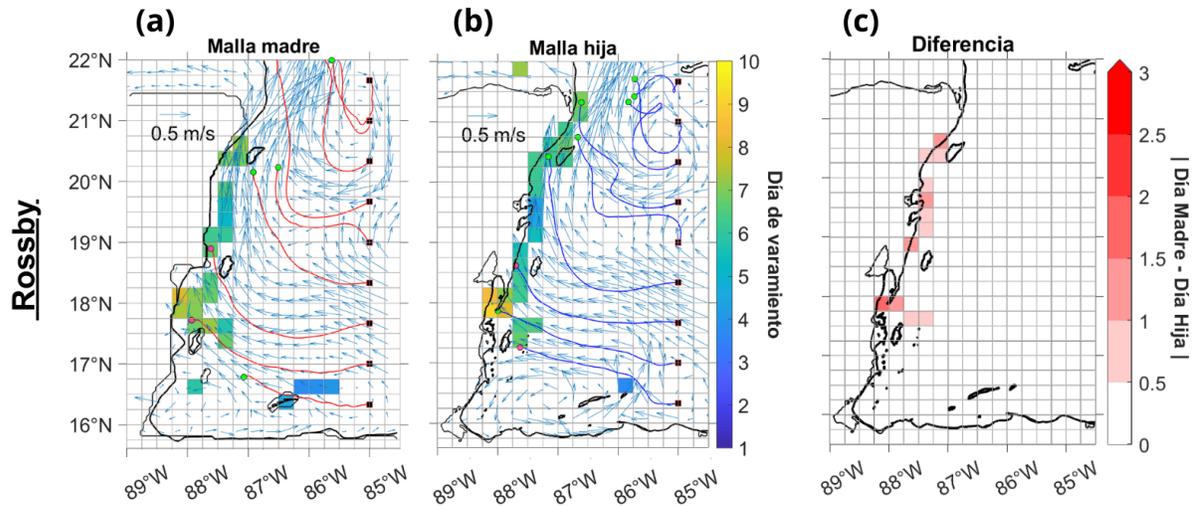
**Figura 39.** Día de arribo promedio para el caso “Promedio” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).

En el caso “Promedio”, las partículas varadas en ambas mallas (Figura 39a, b) arribaron a las Islas de la Bahía entre los días 6 y 8; a las Islas Turneffe entre los días 6 y 9; a Banco Chinchorro a partir del día 8; y a Cozumel en el día 7 en la malla madre y el día 9 en la malla hija. Las mayores diferencias entre las mallas, de aproximadamente 2 días, se registraron en las Islas de la Bahía y Cozumel (Figura 39c). Al considerar todas las partículas varadas, el tiempo de arribo promedio fue de 7.14 días para la malla madre y 7.69 días para la malla hija, con una diferencia de 0.55 días (equivalente a 13 horas y 12 minutos).

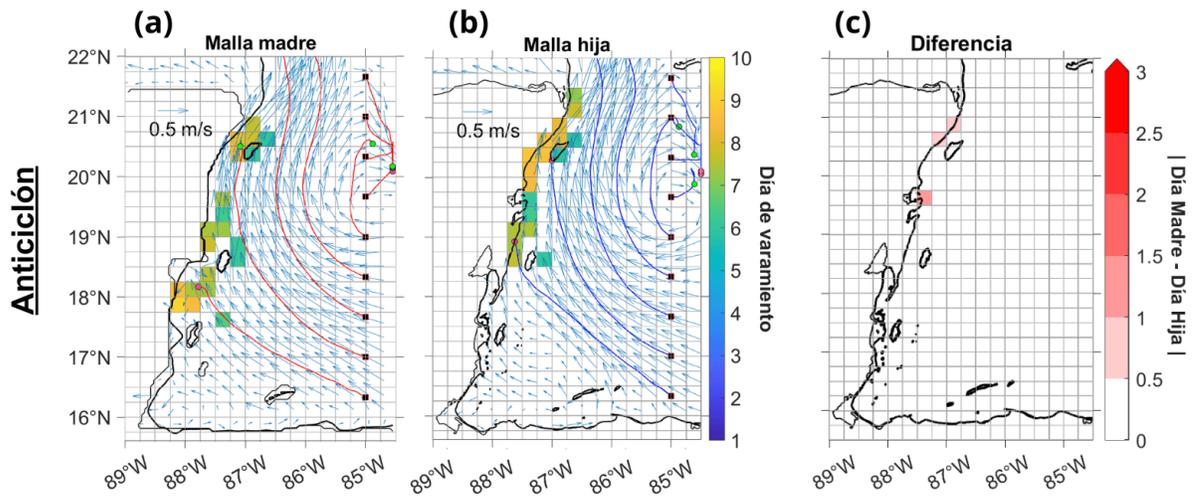
En el caso “Rossby”, en ambas mallas las partículas arribaron a las Islas de la Bahía el día 4, a las Islas Turneffe entre los días 6 y 7, y a la región comprendida entre Banco Chichorro y Cozumel, entre los días 5 y 7 (Figura 40a, b). En la malla madre, las partículas arribaron a Xcalak el día 7, antes que en la malla hija, donde llegaron entre los días 8 y 9. Se registraron diferencias de entre 1 y 2 días a lo largo de la península, desde las Islas Turneffe hasta Cozumel (Figura 40c). Al considerar todas las partículas varadas, el día de arribo promedio total fue 6.26 para la malla madre y 6.21 para la malla hija, con una diferencia de 0.05 días (equivalente a 1 hora y 12 minutos).

En el caso “Anticiclón”, en ambas mallas los tiempos de arribo a Banco Chinchorro fueron entre los días 6 y 7, y a Cozumel entre los días 6 y 9 (Figura 41a, b). En la malla madre, las partículas arribaron a

Xcalak entre los días 7 y 9. Las mayores diferencias entre las mallas fueron de casi 2 días y se localizaron alrededor de la Reserva de Sian Ka'an (Figura 41c). Al considerar todos los tiempos de arribo, el día de arribo promedio total fue 7.01 para la malla madre y 6.79 para la malla hija, con una diferencia de 0.22 días (equivalente a 5 horas y 17 minutos).



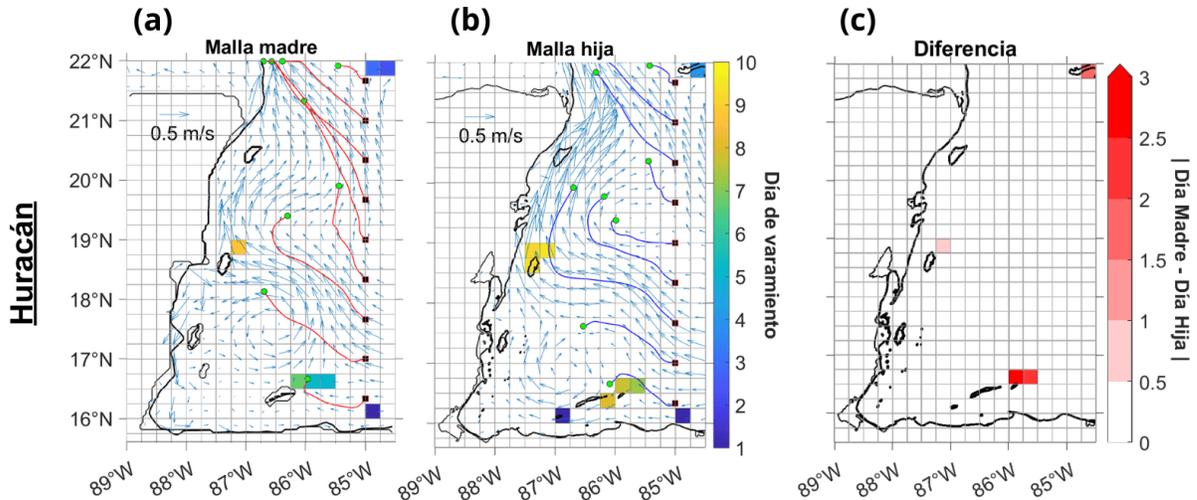
**Figura 40.** Día de arribo promedio para el caso “Rossby” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).



**Figura 41.** Día de arribo promedio para el caso “Anticiclón” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5 %, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).

En el caso “Huracán”, en ambas mallas las partículas llegaron a Banco Chinchorro a partir del día 9 y a

la costa sureste del dominio entre el primer y segundo día (Figura 42a, b). A Cuba arribaron en los días 2-3 en la malla madre y en los días 4-5 en la malla hija. A las Islas de la Bahía llegaron entre los días 5 y 7 en la malla madre y entre los días 7 y 9 en la malla hija. Las mayores diferencias en los tiempos de arribo se localizaron en las Islas de la Bahía, con una diferencia superior a los 3 días, seguidas por Cuba, donde la diferencia fue de aproximadamente 2 días (Figura 42c). Al considerar los tiempos de arribo de todas las partículas, el día de arribo promedio total fue 6.56 para la malla madre y 7.59 para la malla hija, con una diferencia de 1.03 días (equivalente a 24 horas).



**Figura 42.** Día de arribo promedio para el caso “Huracán” en las mallas madre (a) e hija (b) y la diferencia absoluta entre ambas (c). En esta última gráfica, se omitieron las celdas cuya diferencia fuera menor al 0.5%, conforme a la diferencia calculada en la Sección 3.5. Los vectores indican los campos de corrientes promedio del periodo de análisis. Las curvas rojas (azules) corresponden a las trayectorias promedio calculadas cada 1000 partículas en la malla madre (hija).

En resumen, los tiempos de arribo promedio en la malla madre fueron de 7.14, 6.26, 7.01 y 6.56 días para los casos “Promedio”, “Rossby”, “Anticiclón” y “Huracán”, respectivamente. En la malla hija, estos fueron de 7.69, 6.21, 6.79 y 7.59 días para los mismos casos. En general, el tiempo de arribo promedio fue de aproximadamente siete días. El caso con la mayor diferencia entre ambas mallas fue el “Huracán”, con una diferencia de 24 horas; en el resto de los casos, las diferencias fueron menores a 13 horas.

Las diferencias en los tiempos de arribo, equivalentes a 1 día, se registraron en el canal de Cozumel (casos “Promedio” y “Rossby”), en la Reserva de Sian Ka’an (casos “Rossby” y “Anticiclón”), en Xcalak (caso “Rossby”), mientras que las mayores a 2 días se observaron en las Islas de la Bahía (casos “Promedio” y “Huracán”) y en Cuba (caso “Huracán”).

## Capítulo 4. Discusión

---

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos para ambas mallas en relación con el porcentaje de trayectorias, los tiempos de viaje, el porcentaje de varamientos y los tiempos de arribo de las partículas simuladas en los diferentes casos de estudio. Además, se presentarán las perspectivas para trabajos futuros.

### 4.1. Diferencias en el porcentaje de trayectorias y tiempo de viaje

En ambas mallas, las zonas con el mayor porcentaje de trayectorias coincidieron con la corriente de Yucatán, la corriente de Caimán y los remolinos de mesoescala. La ruta de transporte observada en la corriente de Yucatán coincide con la descrita por Allende-Arandía et al. (2023). En su estudio encontraron que la corriente de Yucatán actúa como barrera de transporte que persiste todo el año y es debilitada al incluir el esfuerzo del viento. Ya que en esta zona los vientos son alisios la mayor parte del año, el efecto del viento contribuye al acarreo de partículas suspendidas hacia la costa (Uribe-Martínez et al., 2022; Allende-Arandía et al., 2023; Lara-Hernández et al., 2024). Es importante destacar que, en concordancia con los resultados de Lara-Hernández et al. (2024), las partículas varadas proceden del sur, siguiendo la trayectoria de las corrientes de Caimán/Yucatán.

Por otro lado, se ha demostrado que los remolinos tienen un papel importante en la retención y transporte de sargazo (Brooks et al., 2019; Beron-Vera et al., 2022; Andrade-Canto et al., 2022); en este trabajo se observó el atrapamiento de partículas en remolinos en los casos “Rossby” y “Anticiclón”. Es por esto que modelar correctamente la interacción del sargazo con los remolinos es fundamental. Se ha demostrado que incluir efectos inerciales e interacciones modeladas como redes elásticas en las partículas modifica su comportamiento frente a remolinos, favoreciendo su atrapamiento en estos (Brooks et al., 2019; Beron-Vera et al., 2022; Miron et al., 2020). Además, se ha observado que tras el paso de un ciclón tropical la cobertura de sargazo disminuye, posiblemente debido a su hundimiento (Sosa-Gutierrez et al., 2022). Este trabajo podría mejorarse incorporando los efectos inerciales en las partículas modeladas (por medio de la variación de su flotabilidad) para que su comportamiento se asemeje al del sargazo observado.

En cuanto a los tiempos de viaje, en general, las partículas llegaban a la costa entre los días 4 y 8. En el canal de Yucatán, atravesaban la zona entre los días 2 y 9. Estos resultados sugieren que, para implementar sistemas de pronóstico en el Caribe mexicano en un dominio similar al utilizado en este trabajo, bastarían simulaciones de 10 días si las partículas se siembran cerca de los 85°W. Además, estos

tiempos de viaje coinciden con los obtenidos en las simulaciones realizadas por Lara-Hernández et al. (2024).

En los casos “Rossby” y “Anticiclón”, se observaron tiempos de viaje hasta 5 días mayores en el anticiclón al sur de Cuba en comparación con sus periferias. En simulaciones de 10 días, Lara-Hernández et al. (2024) encontraron que, al incluir el crecimiento del sargazo, el porcentaje de varamientos aumentaba en un 3%. Esto sugiere que podría ser importante considerar el crecimiento del sargazo, especialmente en situaciones donde se quede atrapado durante períodos más prolongados de lo analizado, recirculando en remolinos como el anticiclón al sur de Cuba. No obstante, una variación del 3% puede no ser tan significativa si se busca desarrollar un sistema de pronóstico rápido, ya que incorporar los efectos del crecimiento requeriría más tiempo de cómputo sin proporcionar una mejora considerable.

## **4.2. Diferencias en el porcentaje de partículas varadas y tiempo de arribo**

Tanto los resultados del porcentaje de partículas varadas como los tiempos de arribo mostraron que el caso con la mayor diferencia entre ambas mallas fue el “Huracán” (con una diferencia del 17.18% y de 24 horas). Este resultado sugiere que las diferencias entre mallas pueden ser más relevantes en eventos extremos; no obstante, es necesario corroborar este hallazgo, ya que solo se analizó un caso extremo. Asimismo, se observó que la dinámica oceánica era muy diferente entre ambas mallas en dicho caso.

Las zonas con mayores diferencias en el porcentaje de varamientos y tiempos de arribo fueron las Islas de la Bahía, Cuba, Xcalak y el canal de Cozumel. Además, en la malla hija, las partículas se vararon de manera más dispersa a lo largo de la costa que en la malla madre. Las diferencias en el porcentaje de varamientos en dichos sitios, así como la dispersión de los varamientos entre ambas mallas, probablemente se deben a la influencia de las resoluciones de la línea de costa. Este resultado destaca la importancia de utilizar una línea de costa que sea lo más representativa de la realidad posible.

Estudios previos han indicado que la costa entre Tulum y Puerto Morelos es la más propensa a varamientos debido a la orientación de la costa y la cercanía de Cozumel (Uribe-Martínez et al., 2022; Lara-Hernández et al., 2024). En nuestro estudio, se registraron porcentajes altos de varamientos en esta región para los escenarios “Promedio” en la malla madre y “Anticiclón” en ambas mallas. Además, con base en nuestros hallazgos, también sugerimos que una zona propensa a varamientos es la costa entre Xcalak y Banco Chinchorro.

El alto porcentaje de varamientos desde las Islas Turneffe hasta Banco Chinchorro podría estar relacionado con la latitud en la que la corriente de Caimán impacta contra la península de Yucatán. Así, a mayor latitud, los encallamientos tienden a localizarse más cerca de Banco Chinchorro. Para pronosticar los arribos de sagazo en estas zonas, sería crucial monitorear la migración latitudinal de la corriente de Caimán, dado que ésta varía alrededor de  $2^\circ$  en escalas de aproximadamente 100 días (Badan et al., 2005; Cetina et al., 2006). Los varamientos en Cuba podrían estar modulados por el atrapamiento de partículas en la circulación anticiclónica al sur de la isla. Por último, las partículas sembradas al sur del núcleo de la corriente de Caimán suelen varar en las Islas de la Bahía, posiblemente debido a la influencia de la costa en las corrientes.

### **4.3. Consideraciones finales**

En conclusión, en el área de estudio, las corrientes de Caimán/Yucatán y los remolinos de mesoescala parecen ser dominantes en el transporte de partículas, y la escala espacial necesaria para representarlos se cubre adecuadamente con el modelo de resolución espacial de 5 km. Este resultado es beneficioso para el desarrollo de modelos de pronóstico de arribos de sargazo, ya que reduce el costo computacional con respecto a modelos con mayor resolución espacial (por ejemplo de 1 km). Sin embargo, la implementación de modelos de muy alta resolución podría ser necesaria durante eventos extremos, cerca de las costas o alrededor de islas, donde los procesos involucrados tienden a ser de escalas del orden de metros (Greenberg et al., 2007). Además, como trabajo futuro, se sugiere investigar la influencia de la resolución espacial utilizando modelos oceánicos diferentes.

Los análisis presentados en este trabajo podrían mejorarse al estudiar más eventos y comparar algunos de ellos con distribuciones observadas de sargazo. Además, ampliar el área de estudio hacia el este podría ser una mejora para capturar toda el área de los remolinos que se forman al sur de Cuba.

Los experimentos podrían mejorarse al sembrar las partículas en posiciones detectadas mediante observaciones satelitales, dado que se ha reportado que el porcentaje de varamientos depende de la zona de siembra de las partículas (Lara-Hernández et al., 2024). Finalmente, proponemos incluir efectos inerciales en las partículas para representar de manera más precisa la deriva del sargazo, así como estudiar la influencia de la variación del factor de arrastre del viento en los varamientos.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

En este trabajo se evaluó la distribución del sargazo en el Caribe mexicano mediante el modelado con partículas lagrangianas, comparando las distribuciones obtenidas al emplear campos de corrientes con resoluciones espaciales de 5 y 1 km, con el objetivo de contribuir al desarrollo de sistemas de pronóstico de arribos de sargazo.

La validación de los campos de corrientes generados con el modelo ROMS para ambas mallas mostró que la resolución espacial de 5 km presentaba una mejor correspondencia con las observaciones en comparación con la de 1 km. No obstante, la falta de observaciones de alta resolución y la ausencia de datos de arribos de sargazo representan limitaciones para una validación más robusta. Se sugiere investigar la implementación del refinamiento, ya que se esperaba que la malla hija simulase mejor que la malla madre.

El análisis de las trayectorias indicó que las zonas en las que se acumulan las partículas están determinadas por dinámica de mesoescala, como la corriente de Caimán, la corriente de Yucatán y los remolinos al sur de Cuba. Estos resultados sugieren que un modelo con resolución espacial de 5 km es suficiente para representar la circulación oceánica en esta región.

Los tiempos de arribo a la costa desde la posición inicial de las partículas, así como los tiempos de viaje de las partículas que cruzaron el canal de Yucatán, fueron inferiores a 10 días en ambas resoluciones. Esto sugiere que las simulaciones destinadas a predicciones a corto plazo de arribos de sargazo en el Caribe mexicano, realizadas en dominios similares, pueden ejecutarse con un periodo de simulación de 10 días.

Las mayores diferencias en el porcentaje de varamientos y los tiempos de arribo a la costa se observaron durante el caso “Huracán”, lo que sugiere que la resolución espacial de los modelos de pronóstico es particularmente relevante durante eventos extremos. Asimismo, se identificaron discrepancias entre ambas mallas, las cuales se atribuyeron a la influencia de la resolución de la línea de costa.

Se destacó que las zonas cercanas a Xcalak y Banco Chinchorro son especialmente propensas a los varamientos de sargazo, además de las áreas previamente identificadas en la costa entre Tulum y Puerto Morelos.

Por último, se concluye que mejoras en la metodología lagrangiana, así como ajustes en los esquemas numéricos, la batimetría y la definición de la línea de costa en el modelo ROMS, podrían conducir a resultados más precisos en los porcentajes de varamientos y trayectorias probables.

## Literatura citada

- Allende-Arandía, M. E., Duran, R., Sanvicente-Añorve, L., & Appendini, C. M. (2023). Lagrangian Characterization of Surface Transport From the Equatorial Atlantic to the Caribbean Sea Using Climatological Lagrangian Coherent Structures and Self-Organizing Maps. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *128*(7), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2023JC019894>.
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., & Magaña, V. O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, *69*(2-4), 101–142. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007>.
- Andrade-Canto, F., Beron-Vera, F. J., Goni, G. J., Karrasch, D., Olascoaga, M. J., & Triñanes, J. (2022). Carriers of Sargassum and mechanism for coastal inundation in the Caribbean Sea. *Physics of Fluids*, *34*(1), 016602. <https://doi.org/10.1063/5.0079055>.
- Arakawa, A. (1972). Design of the ucla general circulation model. numerical simulation of weather and climate. *Department of Meteorology, University of California, Technical Report*, *7*, 1–116. Archivo PDF.
- Athié, G., Sheinbaum, J., Leben, R., Ochoa, J., Shannon, M. R., & Candela, J. (2015). Interannual variability in the Yucatan Channel flow. *Geophysical Research Letters*, *42*(5), 1496–1503. <https://doi.org/10.1002/2014GL062674>.
- Badan, A., Candela, J., Sheinbaum, J., & Ochoa, J. (2005). Upper-layer circulation in the approaches to Yucatan channel. *Geophysical Monograph Series*, *161*, 57–69. <https://doi.org/10.1029/161GM05>.
- Berline, L., Ody, A., Jouanno, J., Chevalier, C., André, J. M., Thibaut, T., & Ménard, F. (2020). Hindcasting the 2017 dispersal of Sargassum algae in the Tropical North Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, *158*, 111431. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111431>.
- Beron-Vera, F. J. (2021). Nonlinear dynamics of inertial particles in the ocean: from drifters and floats to marine debris and Sargassum. *Nonlinear Dynamics*, *103*(1), 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-06053-z>.
- Beron-Vera, F. J. & Miron, P. (2020). A minimal Maxey-Riley model for the drift of Sargassum rafts. *Journal of Fluid Mechanics*, *904*, A8. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.666>.
- Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Haller, G., Farazmand, M., Triñanes, J., & Wang, Y. (2015). Dissipative inertial transport patterns near coherent Lagrangian eddies in the ocean. *Chaos*, *25*(8), 087412. <https://doi.org/10.1063/1.4928693>.
- Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Putman, N. F., Triñanes, J., Goni, G. J., & Lumpkin, R. (2022). Dynamical geography and transition paths of Sargassum in the tropical Atlantic. *AIP Advances*, *12*(10), 105107. <https://doi.org/10.1063/5.0117623>.
- Brooks, M. T., Coles, V. J., & Coles, W. C. (2019). Inertia Influences Pelagic Sargassum Advection and Distribution. *Geophysical Research Letters*, *46*(5), 2610–2618. <https://doi.org/10.1029/2018GL081489>.
- Brooks, M. T., Coles, V. J., Hood, R. R., & Gower, J. F. (2018). Factors controlling the seasonal distribution of pelagic sargassum. *Marine Ecology Progress Series*, *599*, 1–18. <https://doi.org/10.3354/meps12646>.
- Butler, J. N., Morris, B. F., Cadwallader, J., Stoner, A. W., & Anonymous (1983). Studies of Sargassum and the Sargassum community. *Bermuda Biological Station Special Publication*, *22*, 1–307. Archivo PDF.

- Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., Badan, A., & Leben, R. (2002). The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, *29*(22), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2002g1015587>.
- Candela, J., Tanahara, S., Crepon, M., Barnier, B., & Sheinbaum, J. (2003). Yucatan Channel flow: Observations versus CLIPPER ATL6 and MERCATOR PAM models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *108*(C12), 1–24. <https://doi.org/10.1029/2003jc001961>.
- Carder, K. L., Fanning, K. A., Betzer, P. R., & Maynard, V. (1977). Dissolved silica and the circulation in the Yucatan Strait and deep eastern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research*, *24*(12), 1149–1160. [https://doi.org/10.1016/0146-6291\(77\)90518-5](https://doi.org/10.1016/0146-6291(77)90518-5).
- Carpenter, E. J. & Cox, J. L. (1974). Production of pelagic Sargassum and a blue-green epiphyte in the western Sargasso Sea. *Limnology and Oceanography*, *19*(3), 429–436. <https://doi.org/10.4319/1974.19.3.0429>.
- Carrillo, L., Johns, E. M., Smith, R. H., Lamkin, J. T., & Largier, J. L. (2015). Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Continental Shelf Research*, *109*, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.014>.
- Centurioni, L. R. & Niiler, P. P. (2003). On the surface currents of the Caribbean Sea. *Geophysical Research Letters*, *30*(6), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2002GL016231>.
- Cetina, P., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., & Badan, A. (2006). Circulation along the Mexican Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *111*(C8), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2005JC003056>.
- Chávez, G., Candela, J., & Ochoa, J. (2003). Subinertial flows and transports in Cozumel Channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *108*(2), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2002jc001456>.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Francisco, V., Estévez, M., Celis, L. B., Monroy-Velázquez, L. V., Leal-Bautista, R., Álvarez Filip, L., García-Sánchez, M., Masia, L., & Silva, R. (2020). Massive influx of pelagic sargassum spp. On the coasts of the mexican caribbean 2014–2020: Challenges and opportunities. *Water (Switzerland)*, *12*(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/w12102908>.
- Coston-Clements, L., Center, L., Hoss, D., & Cross, F. (1991). Utilization of the Sargassum habitat by marine invertebrates and vertebrates: a review. *NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-296*, *296*, 1–32. Archivo PDF.
- Craig, A. (1966). *Geography of Fishing in British Honduras and Adjacent Coastal Waters*. Coastal studies institute. Technical reports. Louisiana State University Press, Louisiana. Archivo PDF.
- Cuevas, E., Uribe-Martínez, A., & de los Ángeles Liceaga-Correa, M. (2018). A satellite remote-sensing multi-index approach to discriminate pelagic Sargassum in the waters of the Yucatan Peninsula, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, *39*(11), 3608–3627. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1447162>.
- d'A. Laffoley, D., Roe, H. S. J., Angel, M. V., Ardon, J., Bates, N. R., Boyd, I. L., Brooke, S., Buck, K. N., a Carlson, C., Causey, B., Conte, M. H., Christiansen, S., Cleary, J., Donnelly, J., a Earle, S., Edwards, R., Gjerde, K. M., Giovannoni, S. J., ... , & Vats, V. (2011). *The protection and management of the Sargasso Sea: The golden floating rainforest of the Atlantic Ocean. Summary Science and Supporting Evidence Case*.

- Dagestad, K. F. & Röhrs, J. (2019). Prediction of ocean surface trajectories using satellite derived vs. modeled ocean currents. *Remote Sensing of Environment*, 223, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.001>.
- Dagestad, K. F., Röhrs, J., Breivik, O., & Ådlandsvik, B. (2018). OpenDrift v1.0: A generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development*, 11(4), 1405–1420. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>.
- Doyle, E. & Franks, J. (2015). Sargassum Fact Sheet. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 1–3. Archivo PDF.
- Dreckmann, K. M. & Sentías, A. (2013). Las arribazones de algas marinas en el caribe mexicano: evento biológico natural o basura en las playas. *Biodiversitas*, 107, 7–11. Archivo PDF.
- Emilsson, I. (1971). Note on the countercurrent in the Yucatan Channel and the western Cayman Sea. *Geofísica Internacional*, 11(3), 139–149. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1971.11.3.1146>.
- Estrada-Allis, S. N., de Souza, J. M. A. C., Pardo, J. S., Ortiz, C. H., Mariño-Tapia, I., & Herrera-Silveira, J. A. (2019). Budget of the total nitrogen in the Yucatan Shelf: driving mechanisms through a physical-biogeochemical coupled model. *Biogeosciences Discussions*, 1–38.
- Ezer, T., Thattai, D. V., Kjerfve, B., & Heyman, W. D. (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. In *Ocean Dynamics*, volume 55, 458–475. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0033-2>.
- Fernandez-Partagas, J. & Mooers, C. N. K. (1975). A Subsynoptic Study of Winter Cold Fronts in Florida. *Monthly Weather Review*, 103(8), 742–744. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1975\)103<0742:assowc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1975)103<0742:assowc>2.0.co;2).
- Franks, J., Jhonson, D., Ko, D., Sanchez-Rubio, G., Hendon, J., & Lay, M. (2011). Unprecedented influx of pelagic Sargassum along Caribbean island coastlines during summer 2011. *Proceedings of the 64th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 1, 1. Archivo PDF.
- Franks, J. S., Johnson, D. R., & Ko, D. S. (2016). Pelagic Sargassum in the Tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*, 27(1), SC6–SC11. <https://doi.org/10.18785/gcr.2701.08>.
- Fu, L.-L. & Holt, B. (1983). Some examples of detection of oceanic mesoscale eddies by the Seasat synthetic-aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, 88(C3), 1844–1852. <https://doi.org/10.1029/jc088ic03p01844>.
- Gallardo, A. H. & Marui, A. (2006). Submarine groundwater discharge: an outlook of recent advances and current knowledge. *Geo-Marine Letters*, 26(2), 102–113. <https://doi.org/10.1007/s00367-006-0021-7>.
- Gordon, A. (1967). Circulation of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 72(24), 6207–6223. <https://doi.org/10.1029/JZ072i024p06207>.
- Gower, J., Young, E., & King, S. (2013). Satellite images suggest a new Sargassum source region in 2011. *Remote Sensing Letters*, 4(8), 764–773. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.796433>.
- Greenberg, D. A., Dupont, F., Lyard, F. H., Lynch, D. R., & Werner, F. E. (2007). Resolution issues in numerical models of oceanic and coastal circulation. *Continental Shelf Research*, 27(9), 1317–1343. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.01.023>.

- Haidvogel, D. B. & Beckmann, A. (1999). *Numerical Ocean Circulation Modeling*. Imperial College Press. Archivo PDF.
- Haidvogel, D. B., Arango, H., Budgell, W. P., Cornuelle, B. D., Curchitser, E., Lorenzo, E. D., Fennel, K., Geyer, W. R., Hermann, A. J., Lanerolle, L., Levin, J., McWilliams, J. C., Miller, A. J., Moore, A. M., Powell, T. M., Shchepetkin, A. F., Sherwood, C. R., Signell, R. P., ... , & Wilkin, J. (2008). Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. *Journal of Computational Physics*, *227*(7), 3595–3624. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.06.016>.
- Hanisak, M. D. & Samuel, M. A. (1987). Growth rates in culture of several species of *Sargassum* from Florida, USA. *Hydrobiologia*, *151*(1), 399–404. <https://doi.org/10.1007/BF00046159>.
- Herrera-Silveira, J. A., Medina-Gomez, I., & Colli, R. (2002). Trophic status based on nutrient concentration scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. *Hydrobiologia*, *475*(1), 91–98. <https://doi.org/10.1023/A:1020344721021>.
- Hoai, N. D., Udo, K., & Mano, A. (2011). Downscaling global weather forecast outputs using ANN for flood prediction. *Journal of Applied Mathematics*, *2011*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1155/2011/246286>.
- Hu, C., Murch, B., Barnes, B., Wang, M., Maréchal, J.-P., Franks, J., Johnson, D., Lapointe, B., Goodwin, D., Schell, J., & Siuda, A. (2016). *Sargassum* watch warns of incoming seaweed. *Eos*, *97*(22), 10–15. <https://doi.org/10.1029/2016eo058355>.
- Hu, C., Zhang, S., Barnes, B. B., Xie, Y., Wang, M., Cannizzaro, J. P., & English, D. C. (2023). Mapping and quantifying pelagic *Sargassum* in the Atlantic Ocean using multi-band medium-resolution satellite data and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, *289*, 113515. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113515>.
- Inoue, M., Handoh, I. C., & Bigg, G. R. (2002). Bimodal distribution of tropical cyclogenesis in the Caribbean: Characteristics and environmental factors. *Journal of Climate*, *15*(20), 2897–2905. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2897:BDOTCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2897:BDOTCI>2.0.CO;2).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2021). Marco geoestadístico nacional. [https://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/tematicos/limites\\_territoriales\\_islas\\_mares.pdf](https://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/tematicos/limites_territoriales_islas_mares.pdf).
- Johns, E. M., Lumpkin, R., Putman, N. F., Smith, R. H., Muller-Karger, F. E., Rueda-Roa, D. T., Hu, C., Wang, M., Brooks, M. T., Gramer, L. J., & Werner, F. E. (2020). The establishment of a pelagic *Sargassum* population in the tropical Atlantic: Biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event. *Progress in Oceanography*, *182*, 102269. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102269>.
- Johnson, D. R., Franks, J. S., Oxenford, H. A., & Cox, S. A. L. (2021). Pelagic *Sargassum* prediction and marine connectivity in the tropical Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*, *31*(1), GCFI20–GCFI30. <https://doi.org/10.18785/GCR.3101.15>.
- Jouanno, J., Benshila, R., Berline, L., Soulié, A., Radenac, M. H., Morvan, G., Sheinbaum, J., Chevalier, C., Thibaut, T., Changeux, T., Menard, F., Berthet, S., Aumont, O., Ethé, C., Nabat, P., & Mallet, M. (2021). A NEMO-based model of *Sargassum* distribution in the tropical Atlantic: Description of the model and sensitivity analysis (NEMO-Sarg1.0). *Geoscientific Model Development*, *14*(6), 4069–4086. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4069-2021>.

- Jouanno, J., Morvan, G., Berline, L., Benshila, R., Aumont, O., Sheinbaum, J., & Ménard, F. (2023). Skillful Seasonal Forecast of Sargassum Proliferation in the Tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters*, *50*(21), e2023GL105545. <https://doi.org/10.1029/2023GL105545>.
- Jouanno, J., Sheinbaum, J., Barnier, B., Molines, J. M., Debreu, L., & Lemarié, F. (2008). The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: Simulations and characteristics with an embedded model. *Ocean Modelling*, *23*(3-4), 82–101. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.04.002>.
- Kinder, T. H. (1983). Shallow currents in the Caribbean Sea and Gulf of Mexico as observed with satellite-tracked drifters. *Bulletin of Marine Science*, *33*(2), 239–246. Archivo PDF.
- Kourafalou, V. H., Mey, P. D., Hénaff, M. L., Charria, G., Edwards, C. A., He, R., Herzfeld, M., Pascual, A., Stanev, E. V., Tintoré, J., Usui, N., van der Westhuysen, A. J., Wilkin, J., & Zhu, X. (2015). Coastal ocean forecasting: System integration and evaluation. *Journal of Operational Oceanography*, *8*(sup1), s127–s146. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1022336>.
- Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico de la NOAA (2024). Programa argo. <https://www.aoml.noaa.gov/es/argo/>.
- Lapointe, B. E. (1986). Phosphorus-limited photosynthesis and growth of *Sargassum natans* and *Sargassum fluitans* (Phaeophyceae) in the western North Atlantic. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, *33*(3), 391–399. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(86\)90099-3](https://doi.org/10.1016/0198-0149(86)90099-3).
- Lapointe, B. E. (1995). A comparison of nutrient-limited productivity in *Sargassum natans* from neritic vs. oceanic waters of the western North Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography*, *40*(3), 625–633. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.3.0625>.
- Lapointe, B. E., West, L. E., Sutton, T. T., & Hu, C. (2014). Ryther revisited: Nutrient excretions by fishes enhance productivity of pelagic *Sargassum* in the western North Atlantic Ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *458*, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.05.002>.
- Lara-Hernández, J., Enriquez, C., Zavala-Hidalgo, J., Cuevas, E., van Tussenbroek, B., & Uribe-Martínez, A. (2024). *Sargassum* transport towards Mexican Caribbean shores: Numerical modeling for research and forecasting. *Journal of Marine Systems*, *241*, 103923. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103923>.
- Large, W. G., McWilliams, J. C., & Doney, S. C. (1994). Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*, *32*(4), 363–403. <https://doi.org/10.1029/94RG01872>.
- Liu, Y. & Weisberg, R. H. (2011). Evaluation of trajectory modeling in different dynamic regions using normalized cumulative Lagrangian separation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *116*(C9), C09013. <https://doi.org/10.1029/2010JC006837>.
- Magaña-Gallegos, E., García-Sánchez, M., Graham, C., Olivos-Ortiz, A., Siuda, A. N., & van Tussenbroek, B. I. (2023). Growth rates of pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, *185*, 103614. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103614>.
- Maréchal, J. P., Hellio, C., & Hu, C. (2017). A simple, fast, and reliable method to predict *Sargassum* washing ashore in the Lesser Antilles. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *5*, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.01.001>.

- Marsh, R., Addo, K. A., Jayson-Quashigah, P. N., Oxenford, H. A., Maxam, A., Anderson, R., Skliris, N., Dash, J., & Tompkins, E. L. (2021). Seasonal Predictions of Holopelagic Sargassum Across the Tropical Atlantic Accounting for Uncertainty in Drivers and Processes: The SARTRAC Ensemble Forecast System. *Frontiers in Marine Science*, *8*, 722524. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.722524>.
- Maul, G. A., Mayer, D. A., & Baig, S. R. (1985). Comparisons between a continuous 3-year current-meter observation at the sill of the Yucatan Strait, satellite measurements of Gulf Loop Current area, and regional sea level. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *90*(C5), 9089–9096. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p09089>.
- Maurer, A. S., Neef, E. D., & Stapleton, S. (2015). Sargassum accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *13*(7), 394–395. <https://doi.org/10.1890/1540-9295-13.7.394>.
- Miron, P., Olascoaga, M. J., Beron-Vera, F. J., Putman, N. F., Triñanes, J., Lumpkin, R., & Goni, G. J. (2020). Clustering of Marine-Debris- and Sargassum-Like Drifters Explained by Inertial Particle Dynamics. *Geophysical Research Letters*, *47*(19), e2020GL089874. <https://doi.org/10.1029/2020GL089874>.
- Molinari, R. L., Spillane, M., Brooks, I., Atwood, D., & Duckett, C. (1981). Surface currents in the Caribbean Sea as deduced from Lagrangian observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *86*(C7), 6537–6542. <https://doi.org/10.1029/jc086ic07p06537>.
- Mooers, C. & Maul, G. (1998). Intra-americas sea circulation. *The sea*, *11*, 183–208. Archivo PDF.
- Moser, M. L. & Lee, D. S. (2012). Foraging over Sargassum by western North Atlantic seabirds. *Wilson Journal of Ornithology*, *124*(1), 66–72. <https://doi.org/10.1676/11-067.1>.
- Murphy, S. J., Hurlburt, H. E., & O'Brien, J. J. (1999). The connectivity of eddy variability in the Caribbean Sea, the Gulf of Mexico, and the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *104*(C1), 1431–1453. <https://doi.org/10.1029/1998jc900010>.
- Muñoz, E., Busalacchi, A. J., Nigam, S., & Ruiz-Barradas, A. (2008). Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet. *Journal of Climate*, *21*(6), 1260–1276. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1855.1>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2024). Adopt a drifter program. <https://www.adp.noaa.gov/>.
- Nowlin Jr, W. D. (1972). Winter circulation patterns and property distributions. *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*, *2*, 2–51. Archivo PDF.
- Ochoa, J., Candela, J., Badan, A., & Sheinbaum, J. (2005). Ageostrophic fluctuations in Cozumel channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *110*(2), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2004JC002408>.
- Ochoa, J., Sheinbaum, J., Badan, A., Candela, J., & Wilson, D. (2001). Geostrophy via potential vorticity inversion in the Yucatan channel. *Journal of Marine Research*, *59*(5), 725–747. <https://doi.org/10.1357/002224001762674917>.
- Oey, L. Y., Lee, H. C., & Schmitz, W. J. (2003). Effects of winds and Caribbean eddies on the frequency of Loop Current eddy shedding: A numerical model study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *108*(C10), 1–25. <https://doi.org/10.1029/2002jc001698>.

- Parr, A. E. (1939). Quantitative observations on the pelagic Sargassum vegetation of the western North Atlantic. *Bulletin of the Bingham Oceanographic Collection*, 6, 1–94. Archivo PDF.
- Pillsbury, J. E. (1887). Gulf stream explorations - observations of currents, appendix 8. *U.S. Coast and Geodetic Survey*, 281–290. Archivo PDF.
- Podlejski, W., Berline, L., Nerini, D., Doglioli, A., & Lett, C. (2023). A new Sargassum drift model derived from features tracking in MODIS images. *Marine Pollution Bulletin*, 188, 114629. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114629>.
- Pope, K. O., Ocampo, A. C., & Duller, C. E. (1991). Mexican site for K/T impact crater? *Nature*, 351, 105. <https://doi.org/10.1038/351105a0>.
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>.
- Putman, N. F., Beyea, R. T., Iporac, L. A. R., Triñanes, J., Ackerman, E. G., Olascoaga, M. J., Appendini, C. M., Arriaga, J., Collado-Vides, L., Lumpkin, R., Hu, C., & Goni, G. (2023). Improving satellite monitoring of coastal inundations of pelagic Sargassum algae with wind and citizen science data. *Aquatic Botany*, 188, 103672. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2023.103672>.
- Putman, N. F., Goni, G. J., Gramer, L. J., Hu, C., Johns, E. M., Trinanes, J., & Wang, M. (2018). Simulating transport pathways of pelagic Sargassum from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Progress in Oceanography*, 165, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.06.009>.
- Putman, N. F., Lumpkin, R., Olascoaga, M. J., Trinanes, J., & Goni, G. J. (2020). Improving transport predictions of pelagic Sargassum. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 529, 151398. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151398>.
- Pérez-Santos, I., Schneider, W., Sobarzo, M., Montoya-Sánchez, R., Valle-Levinson, A., & Garcés-Vargas, J. (2010). Surface wind variability and its implications for the Yucatan basin-Caribbean Sea dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115, C10052. <https://doi.org/10.1029/2010JC006292>.
- Richardson, P. L. (2005). Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(3-4), 429–463. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.11.001>.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordán-Dahlgren, E., & Hu, C. (2022). Spatio-temporal variability of pelagic Sargassum landings on the northern Mexican Caribbean. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100767>.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V., & García-Rivas, M. C. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic Sargassum. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>.
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B., & Jordán-Dahlgren, E. (2017). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015). *FloreCIMIENTOS Algales Nocivos en México. Ensenada: CICESE*, 352, 352–365. Archivo PDF.
- Rodríguez-Muñoz, R., Muñoz-Castillo, A. I., Euán-Avila, J. I., Hernández-Núñez, H., Valdés-Lozano, D. S., Collí-Dulá, R. C., & Arias-González, J. E. (2021). Assessing temporal dynamics on pelagic Sargassum influx and its relationship with water quality parameters in the Mexican Caribbean. *Regional Studies in Marine Science*, 48, 102005. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.102005>.

- Roemmich, D. (1981). Circulation of the Caribbean Sea: A well-resolved inverse problem. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *86*(C9), 7993–8005. <https://doi.org/10.1029/jc086ic09p07993>.
- Rooker, J. R., Turner, J. P., & Holt, S. A. (2006). Trophic ecology of Sargassum-associated fishes in the Gulf of Mexico determined from stable isotopes and fatty acids. *Marine Ecology Progress Series*, *313*, 249–259. <https://doi.org/10.3354/meps313249>.
- Rousset, C. & Beal, L. M. (2010). Observations of the Florida and Yucatan currents from a Caribbean cruise ship. *Journal of Physical Oceanography*, *40*(7), 1575–1581. <https://doi.org/10.1175/2010JP04447.1>.
- Rousset, C. & Beal, L. M. (2011). On the seasonal variability of the currents in the Straits of Florida and Yucatan Channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *116*(C8), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2010JC006679>.
- Schell, J. M., Goodwin, D. S., & Siuda, A. N. (2015). Recent sargassum inundation events in the caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography*, *28*(3), 8–11. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>.
- Schlitz, R. J. (1973). *Net total transport and net transport by water mass categories for Yucatan Channel, based on data for April 1970*. Texas A&M University, Texas. Archivo PDF.
- Schneider, T., Bischoff, T., & Haug, G. H. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, *513*(7516), 45–53. <https://doi.org/10.1038/nature13636>.
- Semtner, A. J. & Chervin, R. M. (1992). Ocean general circulation from a global eddy-resolving model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *97*(C4), 5493–5550. <https://doi.org/10.1029/92jc00095>.
- Servicio Meteorológico Nacional (2022). Huracán "Lisa" del océano atlántico, 30 de octubre al 05 de noviembre del 2022. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2022-Lisa.pdf>.
- Shchepetkin, A. & McWilliams, J. (2009). Correction and commentary for "Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system" by Haidvogel et al., *J. Comp. Phys.* *227*, pp. 3595–3624. *Journal of Computational Physics*, *228*(24), 8985–9000. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.09.002>.
- Shchepetkin, A. F. & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, *9*(4), 347–404. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>.
- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A., & Ochoa, J. (2002). Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, *29*(3), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013990>.
- Skliris, N., Marsh, R., Addo, K. A., & Oxenford, H. (2022). Physical drivers of pelagic sargassum bloom interannual variability in the Central West Atlantic over 2010–2020. *Ocean Dynamics*, *72*(6), 383–404. <https://doi.org/10.1007/s10236-022-01511-1>.
- Smetacek, V. & Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, *504*(7478), 84–88. <https://doi.org/10.1038/nature12860>.
- Sosa-Gutierrez, R., Jouanno, J., Berline, L., Descloitres, J., & Chevalier, C. (2022). Impact of Tropical Cyclones on Pelagic Sargassum. *Geophysical Research Letters*, *49*(6), e2021GL097484. <https://doi.org/10.1029/2021GL097484>.

- South Atlantic Fishery Management Council (2002). Fishery Management Plan for Pelagic Sargassum Habitat of the South Atlantic Region. *South Atlantic Fishery Management Council, Working Paper*, 1–228. Archivo PDF.
- Souza, J. M. A. C. D., Powell, B., Castillo-Trujillo, A. C., & Flament, P. (2015). The vorticity balance of the ocean surface in Hawaii from a regional reanalysis. *Journal of Physical Oceanography*, *45*(2), 424–440. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0074.1>.
- Sukhovey, V., Korotaev, G., & Shapiro, N. (1980). *Hydrology of the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico*. Gidrometeoizdat, Leningrado. Archivo PDF.
- Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. (6th. ed.). Academic press, Estados Unidos de América. Archivo PDF.
- Taylor, J. R. & Thompson, A. F. (2023). Submesoscale Dynamics in the Upper Ocean. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *55*, 103–127. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-031422-095147>.
- Thompson, D., Townsend, T., Wallcraft, A., & Schmitz (1992). Ocean Prediction and the Atlantic Basin: Scientific Issues and Technical Challenges. *Oceanography*, *5*(1), 36–41. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1992.30>.
- Tussenbroek, B. I. V. (2011). Dynamics of seagrasses and associated algae in coral reef lagoons. *Hydrobiológica*, *21*(3), 293–310. Archivo PDF.
- Uribe-Martínez, A., Berriel-Bueno, D., Chávez, V., Cuevas, E., Almeida, K. L., Fontes, J. V., van Tussenbroek, B. I., Mariño-Tapia, I., de los Ángeles Liceaga-Correa, M., Ojeda, E., Castañeda-Ramírez, D. G., & Silva, R. (2022). Multiscale distribution patterns of pelagic rafts of sargasso (*Sargassum* spp.) in the Mexican Caribbean (2014–2020). *Frontiers in Marine Science*, *9*, 920339. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.920339>.
- van Sebille, E., Zettler, E., Wienders, N., Amaral-Zettler, L., Elipot, S., & Lumpkin, R. (2021). Dispersion of Surface Drifters in the Tropical Atlantic. *Frontiers in Marine Science*, *7*, 607426. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.607426>.
- van Tussenbroek, B. I., Arana, H. A. H., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. G., Vega-Zepeda, A., & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, *122*(1-2), 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>.
- Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. *Climate Dynamics*, *29*(4), 411–422. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z>.
- Wang, C. & Lee, S. K. (2007). Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*, *34*(2), L02703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028579>.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, *364*(6448), 83–87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>.
- Webster, R. K. & Linton, T. (2013). Development and implementation of Sargassum early advisory system (SEAS). *Shore Beach*, *81*(3), 1–6. Archivo PDF.
- Whyte, F. S., Taylor, M. A., Stephenson, T. S., & Campbell, J. D. (2008). Features of the Caribbean low level jet. *International Journal of Climatology*, *28*(1), 119–128. <https://doi.org/10.1002/joc.1510>.

- Witherington, B., Hirama, S., & Hardy, R. (2012). Young sea turtles of the pelagic Sargassum-dominated drift community: Habitat use, population density, and threats. *Marine Ecology Progress Series*, 463, 1–22. <https://doi.org/10.3354/meps09970>.
- Wüst, G. & Gordon, A. (1964). *Stratification and Circulation in the Antillean-Caribbean Basins: Spreading and mixing of the water types with an oceanographic atlas*. Columbia University Press, Nueva York. Archivo PDF.
- Wüst, G. (1963). On the stratification and the circulation in the cold water sphere of the Antillean-Caribbean basins An abstract. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 10(3), 165–187. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(63\)90354-1](https://doi.org/10.1016/0011-7471(63)90354-1).

# Anexos

## Anexo A

Tabla con el identificador, ciclo, fecha, longitud y latitud de inmersión de las flotas ARGO utilizadas en la validación del modelo ROMS.

**Tabla 3.** Información de las flotas ARGO.

Identificador de la flota	Ciclo	Fecha	Longitud (°E)	Latitud (°N)
4901716	271	08-08-2022	-85.3104	17.0801
4901716	272	18-08-2022	-84.8651	17.1464
4901716	273	28-08-2022	-84.9393	17.7005
4901716	274	06-09-2022	-84.8455	18.1416
4901716	275	17-09-2022	-84.7222	17.8883
4901716	276	26-09-2022	-85.0454	17.8338
4901716	277	06-10-2022	-85.3499	17.6964
4901716	278	16-10-2022	-85.7474	17.5741
4901716	279	26-10-2022	-85.9591	17.4595
4901716	280	05-11-2022	-85.9842	17.5497
4901716	281	15-11-2022	-85.6757	17.9111
4901716	282	25-11-2022	-85.6381	18.5067
4901716	283	05-12-2022	-85.7891	18.8445
4901716	284	14-12-2022	-86.0913	19.0070
4901716	285	24-12-2022	-86.2661	19.0207
4901716	286	03-01-2023	-86.4492	19.1499
4901716	287	13-01-2023	-86.6497	19.0937
4901716	288	23-01-2023	-86.8108	19.1919
4901716	289	02-02-2023	-87.0727	19.4017
4901716	290	12-02-2023	-87.0410	19.6922
4901716	291	22-02-2023	-86.7427	20.1030
4901716	292	04-03-2023	-86.5223	20.3544
4901716	293	14-03-2023	-86.6864	20.2968
4901716	294	23-03-2023	-86.3501	20.4541
4903354	118	22-12-2022	-85.7321	21.9620
4903354	122	11-01-2023	-85.6464	21.9739
4903354	123	16-01-2023	-85.7252	21.9102

## Anexo B

Tabla con identificador, periodo dentro del área de estudio y estado del lastre de las boyas de deriva utilizadas en la validación del modelo ROMS.

**Tabla 4.** Información de las boyas de deriva del programa global de derivadores de la NOAA.

<b>Identificador</b>	<b>Periodo dentro del área de estudio</b>	<b>Lastre</b>
300534060254280	25-08-2022 18:00:00 a 01-09-2022 18:00:00	No
300534060381890	31-10-2022 18:00:00 a 15-11-2022 18:00:00	No
300534062024800	14-01-2023 18:00:00 a 21-01-2023 18:00:00	No
300234061199810	02-03-2023 00:00:00 a 11-03-2023 06:00:00	Sí
300534062128870	24-05-2023 18:00:00 a 04-06-2023 18:00:00	No
300534061294900	06-06-2023 18:00:00 a 15-06-2023 00:00:00	Sí
300234066530040	25-06-2023 18:00:00 a 04-07-2023 00:00:00	No