

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS, ENSENADA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



**“ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD DE ARRIBO DE HIDROCARBUROS A LA
ZONA COSTERA FRENTE A LA REGIÓN DE PERDIDO, EN CASO DE UN
DERRAME PETROLERO EN AGUAS PROFUNDAS”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

SUSTENTA

FERNANDO JOSÉ BELLO FUENTES



DIRECTOR DE TESIS

Dr. Hector García Nava

CO DIRECTOR DE TESIS

Dr. Fernando Andrade Canto

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, ABRIL DE 2021

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS, ENSENADA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



**“ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD DE ARRIBO DE HIDROCARBUROS A LA
ZONA COSTERA FRENTE A LA REGIÓN DE PERDIDO, EN CASO DE UN
DERRAME PETROLERO EN AGUAS PROFUNDAS”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DR. EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

SUSTENTA

Fernando José Bello Fuentes

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Hector García Nava

CO DIRECTOR DE TESIS

Dr. Fernando Andrade Canto



ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**“ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD DE ARRIBO DE HIDROCARBUROS A LA
ZONA COSTERA FRENTE A LA REGIÓN DE PERDIDO, EN CASO DE UN
DERRAME PETROLERO EN AGUAS PROFUNDAS”**

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA

FERNANDO JOSÉ BELLO FUENTES

Aprobada por:

Dr. Héctor García Nava
Director de tesis

Dr. Fernando Andrade Canto
Sinodal

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Sinodal

Dr. Usama Ismael Yarbuh Lugo
Sinodal

Dr. Rubén Castro Valdez
Sinodal

RESUMEN

La región de Perdido se encuentra frente a las costas de Tamaulipas y Texas, en el Noroeste del Golfo de México (NOGoM). En esta región se realizan actividades de explotación y producción de petróleo y gas, mismas que se pretenden extender a aguas profundas. Las actividades del sector hidrocarburo tienen asociado el riesgo de que ocurran derrames petroleros; dichos derrames pueden causar daños directos a la fauna y flora marina y a las actividades económicas que dependen de estas (e.g., pesca y granjas acuícolas). En este trabajo se determinan los fenómenos oceanográficos que favorecen el arribo de hidrocarburos a la zona costera frente a la región de Perdido (desde la zona costera del norte de Tamaulipas hasta las costas de Luisiana) y se clasifica dicha región en función de la probabilidad de arribo de derrames de hidrocarburos que ocurran en aguas profundas de la zona de Perdido. Particularmente, se detectaron los remolinos coherentes del NOGoM, se definió el radio, el tiempo de coherencia y el porcentaje de retención de partículas de estos, y la relación de dichos remolinos con la persistencia de partículas dentro de esta región. Para ello se realizaron análisis Lagrangianos a partir de datos de altura del nivel del mar (SSH) desde 1993 hasta 2016 provenientes de “*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data*” (AVISO). Posteriormente, se utilizaron los campos de corrientes superficiales (1996-2006) de la implementación del modelo numérico Regional Oceanic Modeling System (ROMS) para simular derrames en la región de Perdido, considerando tres coeficientes de arrastre por viento, y se determinó la probabilidad de arribo de hidrocarburos a las costas del NOGoM. Los derrames se simulaban liberando partículas en tres sitios de interés cada 5 días por 10 años, a las cuales se les dio seguimiento durante cuarenta días. Mediante el uso de altimetría se detectaron un total de 254 remolinos, 73 anticiclones y 181 ciclones. Se identificó una región, centrada en 94.75° W. y 26.75° N., donde ocurren ~30% del total de los remolinos ciclónicos detectados. Además se observó que los remolinos de mesoescala del NOGoM pueden transportar ~60% de la masa que contenían al momento de ser detectados hasta que pierden su coherencia. En promedio, el transporte de masa ocurre por 33 días para los ciclones y por 26 días para los anticiclones. A partir del análisis Lagrangiano de los datos de altimetría se identificaron dos patrones de circulación: uno que favorece la persistencia de partículas dentro del NOGoM y otro que favorece la expulsión de partículas hacia afuera de esta región; ambos patrones están ligados a la presencia de remolinos. Las simulaciones de derrames hipotéticos de hidrocarburos realizados con ROMS indicaron que existen patrones estacionales de la circulación y del viento que influyen el porcentaje de partículas que arriban a la costa. En verano llegan más partículas a las costas de Texas-Luisiana que a la de Tamaulipas, mientras que en invierno y otoño arriban más partículas a las costas de Tamaulipas-Texas que a la de Luisiana. Ambos resultados son consecuencia del efecto del viento y de la intensificación o debilitamiento de la corriente de frontera oeste.

Palabras Claves: **Derrame de hidrocarburos, Noroeste del Golfo de México, análisis Lagrangiano, remolinos de mesoescala.**

ABSTRACT

The Perdido's region is in front of the coast of Tamaulipas and Texas, in the Northwest Gulf of Mexico (NOGoM). In this region exploitation and production activities of oil and gas are being carried out and they are intended to be extended into deeper waters. The hydrocarbon sector activities are associated with the risk of oil spills; these spills can cause direct damages to marine fauna and flora and to the economic activities that depend on them (e.g., fisheries and aquaculture farms). In this work the oceanographic phenomena that favor the arrival of hydrocarbons to the coastal zone in front of Perdido (from the coastal zone of northern Tamaulipas to the coasts of Louisiana) are determined and this coastal zone is classified according to the arrival probability of hydrocarbon spills that occurs in deep waters of Perdido's region. Particularly, the coherent eddies of the NOGoM were identified, their radius, the coherence time, and the percentage of particle retention were defined and the relationship of these eddies with the persistence of particles within this region. For these purposes Lagrangian analyzes were performed using sea surface height data (SSH) from 1993 to 2016 from "*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data*" (AVISO). Subsequently, sea surface currents fields (1996-2006) of the implementation of the Regional Oceanic Modeling System (ROMS) numerical model were used to simulate oil spills in Perdido's region, considering three wind drag coefficients, and the hydrocarbon arrival probability to the coasts of the NOGoM shores was determined. The oil spills were modeled by releasing particles at three sites of interest every five days for ten years which were tracked for 40 days. Using altimetry, a total of 254 eddies, 73 anticyclones, and 181 cyclones were detected. It was identified a region, centered at 94.75° W and 26.75° N., where it occurs $\sim 30\%$ of the total detected cyclones. Furthermore, it was observed that the mesoscale eddies of the NOGoM can transport $\sim 60\%$ of the mass they contained at the time they were detected until they lose their coherence. On average, eddies' mass transport occurs for 33 days for cyclones and 26 days for anticyclones. From the Lagrangian analysis of the altimetry data, two circulation patterns were chosen: one favors the persistence of particles within the NOGoM, and the other favors the advection of particles outward this region; both patterns are linked to the presence of eddies. ROMS simulations of hypothetical oil spills indicated that there are seasonal circulation and wind patterns that influence the percentage of particles arriving onshore. In summer, more particles arrive to the Texas-Louisiana coast than to the Tamaulipas coast, while in winter and fall, more particles arrive to the Tamaulipas-Texas coast than to the Louisiana coast. Both results are the consequence of the effect of wind and the intensification or weakening of the western boundary current.

Key Words: Hydrocarbon spills, Northwestern Gulf of Mexico, Lagrangian Analysis, mesoscale eddies.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis profesores los Doctores Rubén Castro, Reginaldo Durazo, Ismael Yarbuh y en especial a Hector García Nava y a Fernando Andrade Canto por toda la dedicación y su esmero en formarme y en abrirme las puertas a este mundo tan fantástico que es la investigación científica.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California, al Instituto de Investigaciones Oceanológicas y a la Facultad de Ciencias Marinas. A mis amigos y compañeros de la Facultad con quienes he pasado momentos increíbles y con quienes he tenido el gusto de poder compartir y platicar temas de ciencia en la oficina o fuera de ella entre alitas y cervezas.

Agradezco a todos los miembros del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM), quienes también me han apoyado directa o indirectamente con recursos académicos o económicos. Particularmente le agradezco a Rosa Amalia Soto y a Angélica por todo su apoyo en todos los trámites administrativos.

Agradezco especialmente a Miriam Dalila Hernandez por su paciencia y compañía en todo momento. También a mi amigo Fernando Sainz, quien me ha apoyado en varios aspectos y cuyos consejos han sido MUY valiosos en el ámbito personal y económico.

Agradezco a CONACyT por brindarme el apoyo económico para poder realizar estos estudios. Sin estos recursos no habría sido posible para mí alcanzar esta meta.

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Los productos de altimetría utilizados son fueron producidos por SSALTO/DUACS y distribuidos por “Aviso+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>)”, como con el apoyo de CNES. Los datos de EddyWatch ® están disponibles en el sitio web de Horizon Marine, Inc. En <http://www.horizonmarine.com/>.

DEDICATORIAS

Este trabajo es para ti mamá, Inés Fuentes de Bello.

Hemos sacrificado mucho durante estos años...

El tiempo avanza, la vida pasa, con esfuerzo y sacrificio todo se alcanza.

ABREVIATURAS

AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data.
CL	Corriente del Lazo.
EAP	Escenarios de alta persistencia.
EBP	Escenarios de baja persistencia.
GoM	Golfo de México.
NOGoM	Noroeste del Golfo de México.
RCL	Remolinos de la Corriente del Lazo.
RLC	Remolinos Lagrangianos Coherentes.
ROMS	Regional Oceanic Modeling System.
SOGOM	Suroeste del Golfo de México.

INDICE

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
AGRADECIMIENTOS	vi
DEDICATORIAS	vii
ABREVIATURAS	viii
INDICE DE FIGURAS	xii
INDICE DE TABLAS	xviii
CAPÍTULO I.....	1
I.1. Introducción.	1
I.2.1. Objetivo general.....	7
I.2.2. Objetivos específicos.	7
CAPÍTULO II: TIEMPO DE RETENCIÓN Y CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE LOS REMOLINOS DEL NOROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO.....	8
II.1. Resumen.....	9
II.2. Abstract.....	10
II.3. Introducción	11
II.4. Materiales y métodos	14
II.4.1. Datos y detección de remolinos coherentes.....	14
II.4.2. Características de los remolinos.	18
II.5. Resultados	20

II.5.1. Identificación de remolinos en el NOGoM.	20
II.5.2. Estadística descriptiva de remolinos	22
II.6. Discusiones	25
II.6.1. Remolinos del NOGoM.....	25
II.6.2. Características de los remolinos	27
II.6.3. Conclusiones.....	30
 CAPÍTULO III: RETENCIÓN DE PARTÍCULAS PASIVAS POR REMOLINOS DE MESOESCALA EN EL NOROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO.....	 31
III.1. Introducción.....	31
III.2. Materiales y Métodos.	34
III.2.1. Datos, advección, y retención de partículas pasivas.	34
III.2.2. Detección de remolinos coherentes de mesoescala.....	36
III.3. Resultados: Retención e histogramas.	37
III.4. Discusiones y conclusiones.	44
 CAPÍTULO IV: PROBABILIDAD DE ARRIBO DE HIDROCARBUROS A LAS COSTAS FRENTE A LA REGIÓN DE PERDIDO EN CASO DE DERRAME PETROLERO.....	 46
IV.1. Introducción.	46
IV.2. Datos y métodos.	47
IV.2.1. Configuración del modelo.....	48
IV.2.2. Simulaciones de derrames.....	49

IV.2.3. Estructuras Coherentes Lagrangianas Persistentes.	51
IV.3. Resultados.	54
IV.3.1. Evolución de los derrames probabilísticos.	54
IV.3.2. Procesos dinámicos.	75
IV.4. Discusiones y conclusiones.	79
IV.4.1. Derrames de hidrocarburos y arribos a las costas del NOGoM.	79
IV.4.2. Influencia de procesos dinámicos.	80
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES GENERALES.	82
REFERENCIAS.	84

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del NOGoM y de Perdido (polígono rojo). La isóbata de 200 m (curva negra) delimita la profundidad máxima de la plataforma interna (blanco). La plataforma externa se muestra en color sólido azul. Las curvas discontinuas de color gris indican las isóbatas de 1000 y 2000 m.	6
Figura 2 Mapa del Golfo de México mostrando la localización del área de estudio (cuadrado negro). Las curvas negras representan la batimetría y el cuadro rojo delimita la Región C. Las zonas son representadas por los colores sólidos.	14
Figura 3. Ejemplo de detección de un remolino ciclónico. La secuencia de (a) a (f) representa al contorno de la altura de la superficie del mar (curva negra) y los anillos límites calculados a partir de los campos de la desviación de la vorticidad Lagrangeana promedio (curvas amarillas). La cruz representa el centroide del anillo de coherencia (curva roja).....	18
Figura 4. Centroides de anticiclones (a) y ciclones (b) para las zonas 1 (círculos), 2 (cuadrados) y 3 (triángulos) en (a) y (b) la barra de colores indica el radio del remolino. También se muestran el número de anticiclones (c) y ciclones (d) detectados dentro de cajas de 0.5 x 0.5 °. En (c) y (d) la barra de colores representa el número de remolinos detectados dentro de cada caja.....	22
Figura 5. Profundidad correspondiente al centroide de los ciclones (diamantes) y anticiclones (círculos) como función del radio. Las líneas punteadas de color gris delimitan las profundidades para cada zona. La curva de regresión linear está presentada en negro. (b) Diagrama de cajas del radio de los remolinos para cada zona de detección. (c) Diagrama de caja de los períodos de rotación de los remolinos para cada zona de detección. La parte superior de cada caja representa el percentil 75 y la	

parte del fondo de la caja representa el percentil 25; la línea negra dentro de la caja es la mediana, las cruces rojas son los valores aislados. Las barras negras afuera de la caja son el valor máximo y mínimo respectivamente.	23
Figura 6. (a) Diagrama de cajas del tiempo de coherencia de los remolinos para cada zona.	
(b) Diagrama de cajas del porcentaje de masa que conservan los remolinos en cada zona. La parte superior de cada caja representa el percentil 75 y la parte del fondo de la caja representa el percentil 25; la línea negra dentro de la caja es la mediana, las cruces rojas son los valores aislados. Las barras negras afuera de la caja son el valor máximo y mínimo respectivamente.....	25
Figura 7. Localización del área de estudio. Se muestran la cuadrícula de partículas advectadas al tiempo inicial (azul), la batimetría del área (líneas segmentadas de color gris) y la Región C (Rojo) identificada por Bello-Fuentes et al. (2021).	36
Figura 8. Porcentaje de persistencia de partículas dentro del NOGoM al día 45. Las líneas rojas denotan los percentiles 25 y 75 y la línea negra la mediana.	38
Figura 9. Promedio de corrientes geostróficas para (a) los escenarios de baja persistencia de partículas y (b) los escenarios de alta persistencia de partículas.	40
Figura 10. Advección y seguimiento de partículas desde el 13 de marzo de 2005 hasta 45 días después (secuencia a-d). El cuadro cian denota el dominio analizado, las líneas azules son las líneas de corriente. Las partículas advectadas se presentan en color verde y el núcleo de los remolinos es el área café sólida. Los números en magenta representan los días de coherencia del remolino. Dentro de cada subgráfico se muestra el porcentaje de partículas que se encuentra dentro del dominio analizado.....	42
Figura 11. Advección y seguimiento de partículas desde el 13 de octubre de 1993 hasta 45 días después (secuencia a-d). El cuadro cian denota el dominio analizado, las líneas	

azules son las líneas de corriente. Las partículas advectadas se presentan en color verde y el núcleo de los remolinos es el área café sólida. Los números en magenta representan los días de coherencia del remolino. Dentro de cada subgráfico se muestra el porcentaje de partículas que se encuentra dentro del dominio analizado.....	43
Figura 12. Área de estudio. Las líneas segmentadas delimitan el dominio numérico, las áreas asuradas denotan la división de la zona costera en las áreas A, B y C y círculos negros indican los puntos de liberación de partículas denominados P1, P2 y P3.	51
Figura 13. Promedio del Porcentaje Máximo de partículas (paneles superiores) y del Tiempo Mínimo de Arribo (paneles inferiores) para los 10 años de estudio, para el punto de liberación P1 y para las tres condiciones de arrastre por viento analizadas: sin arrastre $C_v=0$ (paneles de la izquierda), $C_v=0.01$ (paneles centrales) y $C_v=0.03$ (paneles de la derecha). Se muestran la trayectoria promedio (línea negra) y las elipses de variabilidad de la posición de las partículas para tres tiempos, $t=5$ (línea azul), 15 (línea cian), y 25 días (línea verde). Cada elipse se dibuja centrada en el centro de masa de las partículas a ese tiempo (círculos azul, cian y verde).	56
Figura 14. Igual que la Figura 13 pero para el punto de liberación P2.	57
Figura 15. Igual que la Figura 13 pero para el punto de liberación P3.	58
Figura 16. Promedio del Porcentaje Máximo de partículas para los periodos de invierno (paneles superiores), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles inferiores) para el punto de liberación P1 y para las tres condiciones de arrastre por viento analizadas: sin arrastre $C_v=0$ (paneles de la izquierda), $C_v=0.01$ (paneles centrales) y $C_v=0.03$ (paneles de la derecha). Se muestran la trayectoria promedio (línea negra) y las elipses de variabilidad de la posición para tres tiempos, $t=5$ (línea azul), 15 (línea	

cian), y 25 días (línea verde). Cada elipse se dibuja centrada en el centro de masa de las partículas a ese tiempo (círculos azul, cian y verde).....	60
Figura 17. Igual que la Figura 16 pero para el punto de liberación P2.	61
Figura 18. Igual que la Figura 16 pero para el punto de liberación P3.	62
Figura 19. Porcentaje de arribo promedio a las zonas A, B y C de partículas liberadas en los puntos P1, P2 y P3, sin arrastre directo del viento $C_v=0$ (panel izquierdo), con $C_v=0.01$ (panel medio y con $C_v=0.003$ (Panel derecho). Las líneas negras son las trayectorias promedio a cada zona y las áreas en tonos de café y gris indican la desviación estándar de las trayectorias.	65
Figura 20. Porcentaje de partículas que arriban a la zona costera provenientes de los puntos de liberación P1 (paneles superiores), P2 (paneles centrales) y P3 (paneles inferiores) para las tres condiciones de arrastre por viento analizadas: sin arrastre $C_v=0$ (paneles de la izquierda), $C_v=0.01$ (paneles centrales) y $C_v=0.03$ (paneles de la derecha). Los colores indican el porcentaje de arribo y los números el tiempo promedio de arribo.	67
Figura 21. Climatología de arribo de partículas mensual a las zonas A (panel superior), B (panel medio), C(panel inferior) para los tres casos de arrastre por viento ($C_v=0$, color olivo; $C_v=0.01$,color verde y $C_v=0.03$ Color rojo), provenientes del punto de liberación P1.	69
Figura 22. Climatología de arribo de partículas mensual a las zonas A (panel superior), B (panel medio), C(panel inferior) para los tres casos de arrastre por viento ($C_v=0$, color olivo; $C_v=0.01$,color verde y $C_v=0.03$ Color rojo), provenientes del punto de liberación P2.	69
Figura 23. Climatología de arribo de partículas mensual a las zonas A (panel superior), B (panel medio), C(panel inferior) para los tres casos de arrastre por viento ($C_v=0$, color	

olivo; $C_v=0.01$,color verde y $C_v=0.03$ Color rojo), provenientes del punto de liberación 3.	70
Figura 24. Promedio estacional del porcentaje de partículas liberadas en P1 que arriban a las zonas A, B y C en los meses de invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha para el otoño. Los 3 paneles superiores corresponden a la condición sin arrastre directo del viento, los paneles centrales a $C_v=0.01$ y los paneles inferiores a $C_v=0.03$	72
Figura 25. Promedio estacional del porcentaje de partículas liberadas en P2 que arriban a las zonas A, B y C en los meses de invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha para el otoño. Los 3 paneles superiores corresponden a la condición sin arrastre directo del viento, los paneles centrales a $C_v=0.01$ y los paneles inferiores a $C_v=0.03$	73
Figura 26. Promedio estacional del porcentaje de partículas liberadas en P3 que arriban a las zonas A, B y C en los meses de invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha para el otoño. Los 3 paneles superiores corresponden a la condición sin arrastre directo del viento, los paneles centrales a $C_v=0.01$ y los paneles inferiores a $C_v=0.03$	74
Figura 27. Energía cinética promedio (panel de la izquierda) y estructuras Lagrangianas coherentes persistentes, pLCS (panel de la derecha) calculadas para los 10 años de estudio. Las líneas negras son las líneas de corriente de la circulación promedio de los 10 años y los círculos negros representan los tres puntos de liberación de partículas.	76
Figura 28. Promedio estacional de la energía cinética (paneles superiores), la energía cinética turbulenta (paneles de en medio) y estructuras Lagrangianas coherentes	

persistentes, pLCS (paneles inferiores) para el invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha). Las líneas negras son las líneas de corriente de la circulación promedio de los 10 años y los círculos negros representan los tres puntos de liberación de partículas. 78

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad y características de los remolinos detectados con un método Lagrangiano en el Noroeste del Golfo de México desde 1993 hasta 2016.....	21
---	----

CAPÍTULO I



CAPÍTULO I

I.1. Introducción.

Las actividades petroleras están asociadas al riesgo de ocurrencia de derrames de petróleo (e.g., Beyer et al., 2016; Jernelöv y Lindén, 1981). Este contaminante puede ser impulsado por las corrientes, viento, oleaje y mareas durante varias millas causando daños a la flora, la fauna y daños económicos. Los derrames de petróleo como el del Deep Water Horizon en 2010, causaron graves daños al medio ambiente (Beyer et al., 2016) y a la economía (Sumaila et al., 2012). Las investigaciones sobre el efecto de la contaminación del petróleo en los corales indican que puede dañar el sistema reproductivo de estos, reducir su esperanza de vida o incluso detener la nueva colonización (Loya y Rinkevich, 1980; Silva et al., 2016) y a las industrias con actividades costa afuera. Particularmente, en el Noroeste del Golfo de México (NOGoM) se encuentra la Región de Perdido (

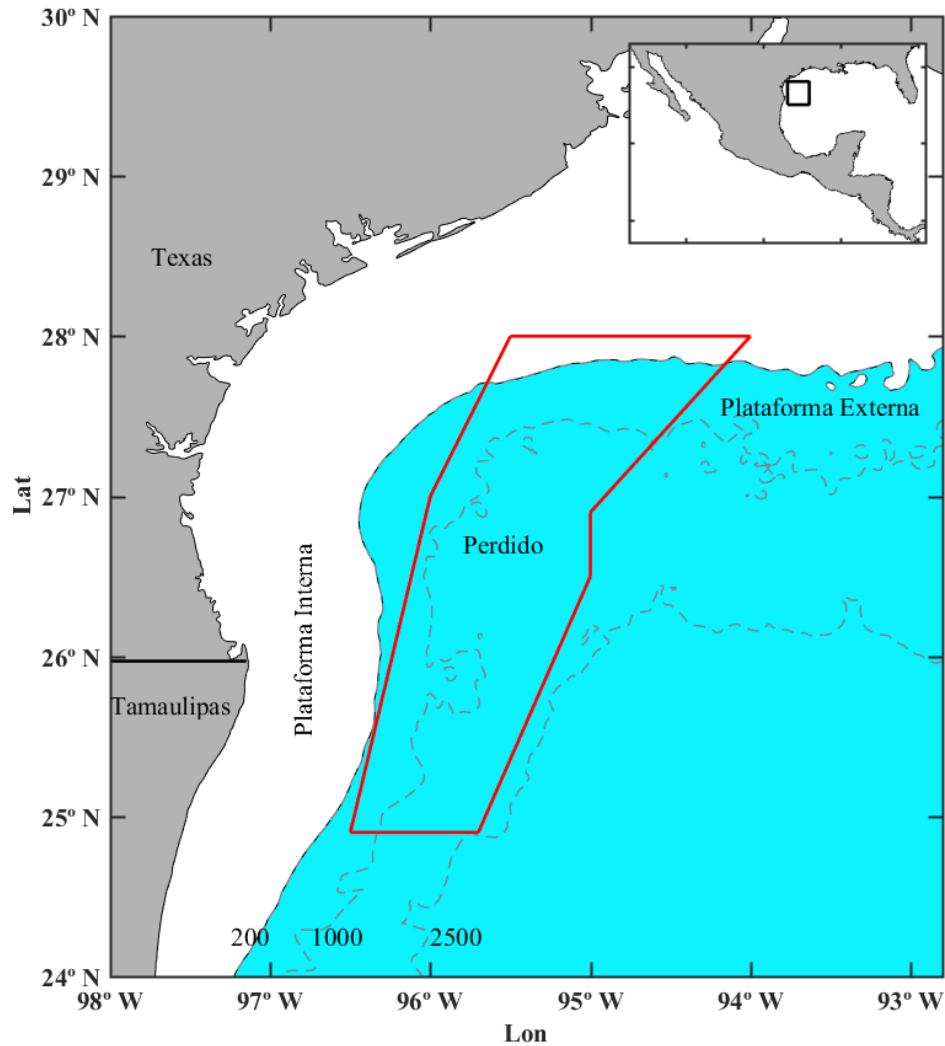


Figura 1); en la cual se ha observado que hay un aumento de las actividades petroleras (Durán, 2020) y basado en los antecedentes de derrames en otras regiones del mundo, se puede suponer que estos eventos también pueden ocurrir en esta región. Particularmente en las costas de Tamaulipas-Texas se encuentra la Laguna madre, la cual es un humedal de importancia internacional de categoría Ramsar (www.ramsar.org) Además en dichas costas se realizan diferentes actividades económicas como por ejemplo pesca y acuicultura de camarón (SE, 2019; Sumaila et al., 2012) y un derrame de hidrocarburos podría causar un

CAPÍTULO I



impacto ambiental, social y económico como el que causó el derrame del Deep Water Horizon (Beyer et al., 2016; Sumaila et al., 2012).

En general, la circulación superficial del Golfo de México (GoM) es anticiclónica. Los principales forzantes de movimiento en el GoM son la acción de los vientos (Zavala-Hidalgo et al., 2014), la Corriente del Lazo (CL) (Leben, 2005), el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera, y las descargas fluviales (Monreal-Gómez et al., 2004). En general el viento en el GoM tiene dirección hacia el oeste aunque presenta una marcada estacionalidad. Durante el verano los vientos tienen dirección predominante hacia el noroeste debido a la influencia del sistema atmosférico semipermanente de alta presión del Atlántico Norte sobre la región del NOGoM. A partir de septiembre el patrón del viento cambia debido a los vientos fríos asociados al sistema atmosférico de alta presión que se desplaza desde el noroeste de Estados Unidos hacia el GoM y a que el sistema semipermanente de alta presión del Atlántico norte se desplaza hacia el noreste, mientras que durante el otoño, el viento es en general hacia el oeste (Zavala-Hidalgo et al. 2014; Zavala-Hidalgo et al., 2003). En los meses de mayo a noviembre el GoM es ocasionalmente afectado por ciclones tropicales y durante septiembre a abril por los frentes fríos; ambos eventos pueden generar vientos muy intensos (Zavala-Hidalgo et al., 2014). Los vientos que no están asociados a los ciclones o los frentes fríos son menos intensos pero igualmente son importantes en los flujos de calor, la formación de la capa de mezcla y en la circulación superficial.

La CL es una corriente intensa que entra al GoM por el estrecho de Yucatán, se extiende hacia el norte del GoM y da un giro al este para salir por el estrecho de Florida (Andrade-Canto et al., 2013; Elliott, 1982; Meunier et al., 2018; Vidal et al., 1994; Zavala-Hidalgo et al., 2014). Esta corriente comunica el interior del GoM con el Océano Atlántico Norte dando

CAPÍTULO I



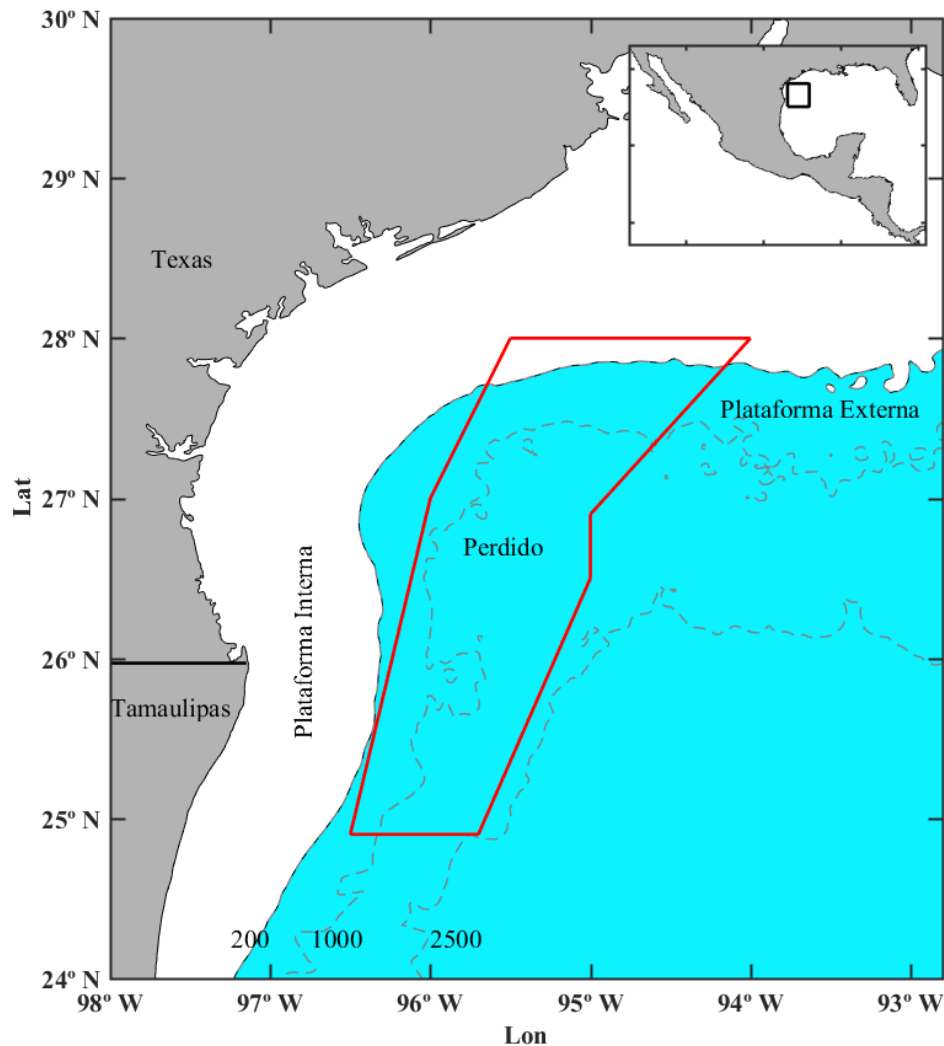
origen a la Corriente del Golfo (Candela et al., 2002). Recibe su nombre por la forma de lazo que presenta dentro del GoM. De esta corriente se desprenden grandes remolinos anticiclónicos, denominados remolinos de la Corriente del Lazo (RCLs), con diámetros de hasta 300 km (Nowlin et al., 1998; Oey et al., 2005) en intervalos irregulares que van de los 15 días a los 18 meses (Andrade-Canto et al., 2013). Comúnmente, los RCLs influyen la circulación, las propiedades hidrográficas y las masas de agua del GoM. Se desplazan hacia el oeste hasta que impactan contra el talud de la plataforma oeste del GoM, donde pueden intercambiar momento con su entorno y generar corrientes costeras (Biggs et al., 1996, Ohlmann y Niiler, 2005); además de generar remolinos a través de su interacción con la costa (Vidal et al., 1994) y con otros remolinos presentes en la región (Hamilton et al., 1999).

Particularmente, la circulación superficial del NOGoM es muy dinámica y está dominada por la extensión norte de una corriente de frontera persistente que fluye anticiclónicamente a lo largo de la plataforma continental. La corriente de frontera es impulsada en gran parte por el viento. Esta corriente presenta una variabilidad estacional con corrientes más fuertes en verano que en otoño (Oey, 1995; Sturges et al., 1993). La variabilidad adicional en la corriente límite occidental es proporcionada por la interacción de esta con las estructuras de mesoescala presentes en la región, principalmente los remolinos que se desprenden de la CL y que tienden a propagarse hacia el NOGoM (Sutyrin et al., 2003). La circulación en la plataforma interna (la plataforma interna es el área entre la costa y la isóbata de 200 m) es principalmente inducida por el efecto del viento y por las descargas de los ríos. Frente a las costas de Tamaulipas la corriente fluye principalmente hacia el Norte mientras que frente a Texas y Luisiana, existe una marcada estacionalidad con circulación anticiclónica en el verano que se invierte en el invierno (Ivanov et al., 2005; Zavala-Hidalgo et al., 2003). Esta

CAPÍTULO I



inversión en la corriente en parte se debe a los gradientes de densidad generados por las descargas de aguas dulces de los ríos (e.g., Atchafalaya y Misisipi) y el cambio en la dirección del viento (Zavala-Hidalgo et al., 2014). La circulación en aguas profundas es influenciada principalmente por la presencia de remolinos de mesoescala. Estos remolinos pueden ser de una gran variedad de tamaños y períodos; y pueden tener su origen en la CL o pueden generarse localmente (Hamilton, 2007).



CAPÍTULO I



Figura 1. Ubicación geográfica del NOGoM y de Perdido (polígono rojo). La isóbata de 200 m (curva negra) delimita la profundidad máxima de la plataforma interna (blanco). La plataforma externa se muestra en color sólido azul. Las curvas discontinuas de color gris indican las isóbatas de 1000 y 2000 m.

A pesar de todos los esfuerzos realizados para entender la dinámica del NOGoM, aún se desconoce por cuanto tiempo los remolinos de esta región son coherentes y el porcentaje de masa que logran retener desde que son detectados hasta que pierden su coherencia; tampoco se conoce el impacto que tienen dichos remolinos sobre la persistencia de partículas dentro del NOGoM o si existen patrones particulares en la mesoescala que favorezcan la persistencia o advección de partículas o contaminantes hacia el exterior del NOGoM. Por último, se desconoce hacia donde podría dirigirse un derrame de hidrocarburos proveniente de aguas profundas en dicha región y cuál sería el porcentaje de dicho derrame que pudieran llegar a las costas de esta región.

En este trabajo se abordan estas preguntas a través de los siguientes tres capítulos. En el Capítulo II se realiza una estadística espacio-temporal de los remolinos del NOGoM y se evalúa su capacidad de transporte y retención, en el Capítulo III se explica el efecto que tienen los remolinos de mesoescala sobre la persistencia de hidrocarburos provenientes de derrames en el NOGoM y por último en el Capítulo IV se determina la probabilidad de arribo de hidrocarburo a la zona costera a partir de derrames en la zona de aguas profundas de la región de Perdido.

CAPÍTULO I



I.2.1. Objetivo general.

Determinar los fenómenos oceanográficos que favorecen el arribo de hidrocarburos a la zona costera frente a la región de Perdido (desde la zona costera del norte de Tamaulipas hasta las costas de Luisiana) y clasificar dicha región en función de la probabilidad de arribo a la costa en caso de que ocurran eventos de derrames de hidrocarburos en la región de Perdido.

I.2.2. Objetivos específicos.

I.2.2.1. Definir las características geométricas, de coherencia y de retención de partículas de los remolinos de mesoescala detectados con un método Lagrangiano en el NOGoM entre 1993 hasta 2016.

I.2.2.2. Explicar el efecto que tienen los remolinos de mesoescala sobre la persistencia de hidrocarburos provenientes de derrames en el NOGoM.

I.2.2.3. Calcular la probabilidad de arribo de hidrocarburos a las costas frente a Perdido en caso de derrames de petroleros provenientes de sitios, en aguas profundas, donde se realizarán las actividades de explotación petrolera-

CAPÍTULO II



CAPÍTULO II: TIEMPO DE RETENCIÓN Y CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE LOS REMOLINOS DEL NOROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO.

La información contenida en este capítulo se encuentra en el artículo “Tiempo de retención y capacidad de transporte de los remolinos del Noroeste del Golfo de México.”, aceptado para su publicación en la revista Ciencias Marinas.

CAPÍTULO II



II.1. Resumen

Los remolinos son estructuras transitorias que influyen en gran medida en la circulación promedio del océano. Modifican la distribución de masa y propiedades como calor, sal, clorofila y de partículas inertes. La capacidad que tienen los remolinos para transportar propiedades o partículas depende de su capacidad de retención de estas. En este estudio se identifican y caracterizan los remolinos de mesoescala del Noroeste del Golfo de México (NOGoM) a través de un método Lagrangeano que permite evaluar el tiempo de retención y la fracción de masa que pueden retener y transportar. Para el análisis se utilizan datos diarios de altimetría desde 1993 hasta 2016. En el periodo de estudio se detectaron un total de 254 remolinos, 73 anticiclones y 181 ciclones. Se identificó una región en 94.75° W y 26.75° N donde ocurren $\sim 30\%$ del total de los remolinos ciclónicos detectados entre las isóbatas de 1000 y 2500 m. En promedio, el radio de los remolinos es de ~ 40 km (isobata < 1000 m) y ~ 70 km (isobata > 2500 m). Los remolinos de mesoescala del NOGoM pueden transportar $\sim 60\%$ de la masa que contenían al momento de ser detectados. En promedio, el transporte de masa ocurre por 33 días para los ciclones y por 26 días para los anticiclones. Rara vez ocurre por 60 días o más.

Palabras Claves: remolinos, método Lagrangeano, retención de masa de agua, derrame de hidrocarburos, transporte.

CAPÍTULO II



II.2. Abstract

Eddies are transient structures that strongly influence the mean circulation of the ocean. They modify the distribution of mass and properties distribution such as heat, salt, chlorophyll, and passive particles. The eddies' capacity to transport properties or particles depends on their retention capacity. In this study the eddies of the Northwestern Gulf of Mexico (NOGoM) are identified and characterized through a Lagrangian method that allows estimation of the retention time and the mass fraction that they can retain and transport. For the analysis, 1993-2016 daily altimetry data is used. A total of 254 eddies, 73 anticyclones and 181 cyclones were detected between 1993 and 2016.. It was identified that in the region at 94.75° W and 26.75° N between the 1000 and 2500 m isobath, occur ~30% of the total of detected eddies. On average, the eddies' radius is ~40 km (isobath < 1000 m) and ~ 70 km (isobath > 2500 m). NOGoM's mesoscale eddies can transport ~60% of the mass that they had at the detection moment. On average, the mass transport occurs over 33 days for cyclonic and 26 days for anti-cyclonic. It rarely occurs for 60 días or more.

Key words: eddies, Lagrangian method, water mass retention, oil spill, transport.



II.3. Introducción

Los remolinos son estructuras muy comunes en el océano que tienen un impacto importante en el transporte de masa y propiedades como el calor y la sal. Por ejemplo, los remolinos que se liberan de la corriente del Lazo (CL) transportan agua del Caribe a través del golfo de México (GM) (Nowlin et al. 1998, Oey et al. 2005, Tenreiro et al. 2018). Se ha demostrado que los remolinos pueden modular la distribución de clorofila mediante advección horizontal (Chelton et al. 2011a), además de aumentar la productividad mediante mecanismos de surgencia (Hamilton y Lee 2005). Los remolinos también pueden afectar la distribución y el transporte del plancton y de larvas de peces (Lobel y Robinson 1988, Sánchez-Velasco et al. 2013, Condie y Condie 2016).

La circulación general del GoM es anticiclónica y su dinámica está influenciada por la CL (Elliott 1982, Vidal et al. 1994, Zavala-Hidalgo et al. 2014, Meunier et al. 2018). La CL es una corriente intensa que entra al GM por el estrecho de Yucatán, se extiende hacia el norte del GM y da un giro al este para salir por el estrecho de Florida (Andrade-Canto et al. 2013). Recibe su nombre por la forma de lazo que presenta dentro del GM. De la CL se desprenden grandes remolinos anticiclónicos con diámetros de hasta 300 km (Nowlin et al. 1998, Oey et al. 2005), en intervalos irregulares que van de los 15 días a los 18 meses (Andrade-Canto et al. 2013). Comúnmente, los remolinos que se liberan de la CL influyen en la circulación, las propiedades hidrográficas y las masas de agua del GM. Se desplazan hacia el oeste hasta impactar contra el talud de la plataforma oeste del GM, donde pueden intercambiar momento con su entorno y generar corrientes costeras (Biggs et al. 1996, Ohlmann y Niiler 2005), además de generar remolinos a través de su interacción con la costa (Vidal et al. 1994) y con otros remolinos (Hamilton et al. 1999) presentes en la región.

CAPÍTULO II



El noroeste del GM (NOGM) (Fig. 1) es una región altamente dinámica con una gran cantidad de remolinos (Merrell y Morrison 1981, Vidal et al. 1992, Vidal et al. 1994, Hamilton 2007). La circulación está dominada por remolinos ciclónicos y anticiclónicos de tamaños, periodos y tiempos de duración ampliamente variables. Comúnmente se presentan varios remolinos de forma simultánea (Hamilton 2007). Además, se sabe que en esta región existen remolinos cuya generación es independiente de los remolinos que se liberan de la CL (Hamilton 2007).

Los remolinos del NOGM han sido estudiados mediante hidrografía (Hamilton 1992, Hamilton et al. 2002), derivadores (Ohlmann et al. 2001), boyas ancladas (Hamilton y Lee 2005), altimetría satelital de las anomalías del nivel del mar (Leben 2005) e incluso mediante la combinación de diferentes métodos (Hamilton 2007). En los diferentes estudios se han definido las características morfológicas de los remolinos; sin embargo, esto se ha hecho bajo el supuesto de que la masa de agua contenida dentro de ellos es siempre la misma (Chelton et al. 2011b). Beron-Vera et al. (2008) demostró que la frontera de los remolinos, obtenida mediante métodos eulerianos como contornos de altura del nivel del mar (SSH, por sus siglas en inglés) u Okubo-Weiss (Okubo 1970, Weiss 1991), por lo general, se deforma en pocos días y, por tanto, parte de la masa que encierra dicha frontera se dispersa en el medio circundante. Adicionalmente, diversos estudios han demostrado que la capacidad de transporte de masa de los remolinos es limitada, pues durante su recorrido, intercambian agua con su entorno (e.g., Biggs et al. 1996, Lipphardt et al. 2008, Wang et al. 2016). Particularmente, Lipphardt et al. (2008) demostraron que gran parte del núcleo original del remolino Millennium (ocurrido durante el año 2001) se dispersó en el oeste del GM y que su núcleo contenía agua del golfo occidental y no solamente agua del Caribe. Por lo tanto, para

CAPÍTULO II



analizar la capacidad de transporte de los remolinos, es recomendable estudiarlos desde un punto de vista Lagrangiano que permita distinguir procesos que son difíciles de apreciar a partir de líneas de corriente o de contornos de SSH (Lipphardt et al. 2008; Beron-Vera et al. 2008, 2013).

Pocos estudios han cuantificado por cuánto tiempo los remolinos son capaces de transportar masa y conservar sus propiedades (d'Ovidio et al. 2013, Condie y Condie 2016, Cetina-Heredia et al. 2019). Este tema es de particular interés en el NOGM, dado que la dinámica oceánica de la región está influenciada por una gran cantidad de remolinos (Andrade-Canto et al. 2013, Meunier et al. 2018). Además, en dicha región se desarrolla una intensa labor petrolera, la cual se pretende extender hacia aguas más profundas. Un derrame de hidrocarburos puede costar millones de dólares en pérdidas y en daños ambientales, como en el caso del derrame del Deep Water Horizon (e.g., Smith et al. 2011). En caso de un derrame de hidrocarburos en el NOGM, es importante evaluar el efecto que podrían tener los remolinos en la retención y dispersión de hidrocarburos en esta región. Esta información puede utilizarse para realizar predicciones en términos de tiempos de retención.

En este trabajo, se identifican los remolinos presentes en el NOGM entre enero de 1993 y diciembre de 2016. Se determina la frontera de los remolinos, sus características morfológicas, el tiempo que estos pueden transportar una masa de agua en su interior (tiempo de coherencia) y el porcentaje de masa que retienen durante dicho tiempo. Para ello, se utiliza el método propuesto por Haller et al. (2016), en el que se definen los remolinos como vórtices Lagrangianos rotacionalmente coherentes.

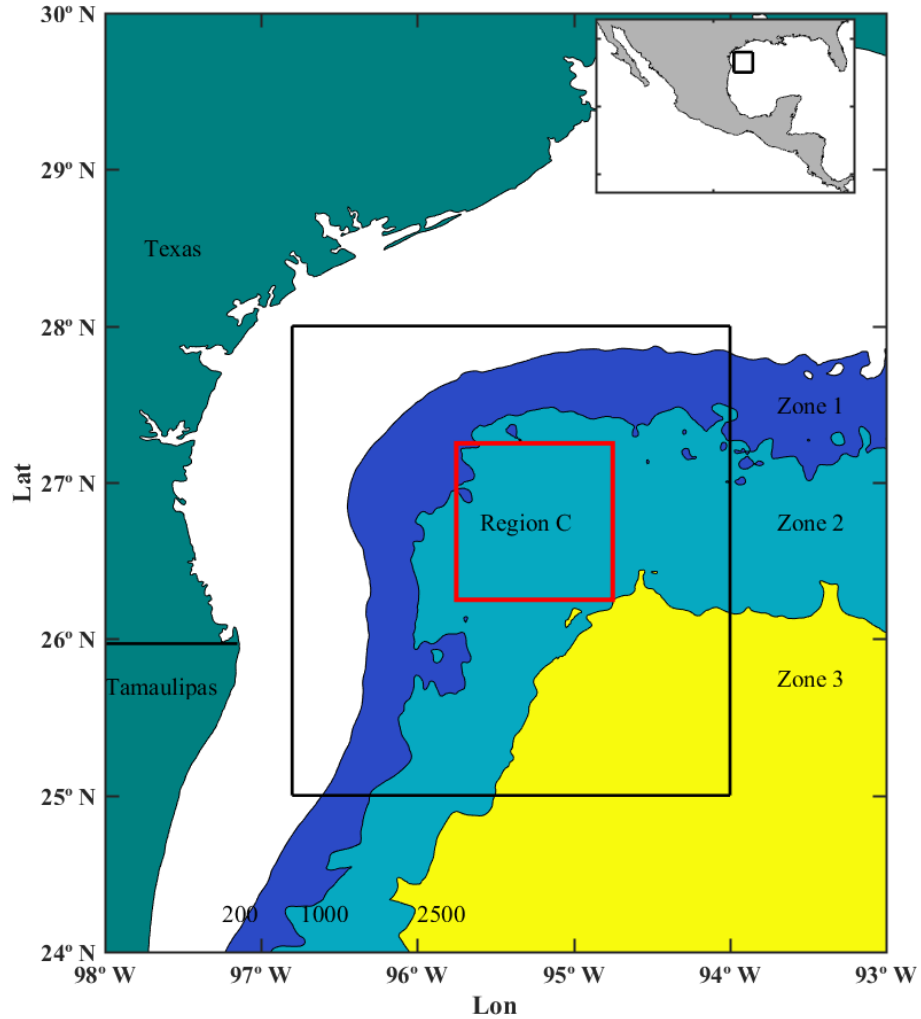


Figura 2 Mapa del Golfo de México mostrando la localización del área de estudio (cuadrado negro). Las curvas negras representan la batimetría y el cuadro rojo delimita la Región C. Las zonas son representadas por los colores sólidos.

II.4. Materiales y métodos

II.4.1. Datos y detección de remolinos coherentes.

La detección de remolinos se realiza a partir del campo de corrientes superficiales geostróficas $\tilde{v} = (u, v)$ calculadas a partir de la topografía dinámica absoluta η como:

$$u = \frac{g}{f} \frac{\delta \eta}{\delta y}, \quad v = -\frac{g}{f} \frac{\delta \eta}{\delta x}; \quad \text{Ec. 1}$$

CAPÍTULO II



donde g es la aceleración gravitatoria, $f = 2\Omega \sin \lambda$ es el parámetro de Coriolis, Ω es la velocidad angular de rotación de la Tierra y $\tilde{x} = (x, y)$ es el vector posición y λ es la latitud.

Para este estudio se utilizaron los campos de altura del nivel del mar (SSH) obtenidos de la base de datos de “*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data*”, (AVISO, <https://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). Los datos utilizados cubren el período de enero de 1993 a diciembre de 2016 y tienen una resolución espacial de $\frac{1}{4}$ de grado y temporal de un día. Los datos se encuentran disponibles en la base de datos de Copernicus Marine Services en la siguiente dirección web: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEA_LEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047 (agosto, 2020).

El método para la detección de remolinos utilizado en este trabajo se basa en el cálculo del campo de la desviación de la vorticidad Lagrangeana promedio (LAVD, por sus siglas en inglés). El campo de LAVD es una medida dinámicamente consistente y objetiva de la rotación de material neto, relativo al promedio espacial de la rotación del volumen del fluido. Este método permite identificar objetivamente tubos materiales a lo largo de los cuales pequeños volúmenes de fluido experimentan la misma rotación neta en un intervalo de tiempo $[t_0, t_\tau]$ relativo a la rotación de cuerpo rígido promedio del fluido. Por tanto, es posible detectar el límite de un remolino de manera clara. Estos límites no presentan filamentación y el interior del remolino no tiene mezcla advectiva con sus alrededores (Haller et al., 2016).

Del campo de velocidades geostróficas se puede obtener la trayectoria de las partículas de fluido resolviendo

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = \tilde{v}, \quad \text{Ec. 2}$$

CAPÍTULO II



con lo que se define el mapa de flujo (Haller et al., 2016)

$$F_{t_0}^t: \tilde{x}_0 \rightarrow \tilde{x}(t; x_0), t \in [t_0, t_f], \quad \text{Ec. 3}$$

que da seguimiento a las partículas desde su posición inicial x_0 al tiempo inicial, t_0 , hasta una posición posterior $\tilde{x}(t; x_0)$ al tiempo.

La vorticidad relativa ω de las partículas que pertenecen al mapa de flujo se calcula para cada instante de tiempo como,

$$\omega(\tilde{x}(t; x_0), t) = \frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy}, \quad \text{Ec. 4}$$

y el campo de LAVD se define matemáticamente como (Haller et al., 2016)

$$LAVD_{t_0}^t(x_0) := \int_{t_0}^t |\omega(x(s; x_0), s) - \bar{\omega}(s)| ds; \quad s, t \in [t_0, t_f] \quad \text{Ec. 5}$$

donde $\bar{\omega}$ es la vorticidad instantánea promedio las partículas.

Con base en la definición de LAVD un remolino contiene una familia anidada de superficies de nivel de LAVD, con valores máximos en el centro (Haller et al., 2016). El anillo más externo de esa familia de curvas anidadas (anillo límite), define la frontera del conjunto de partículas que se mantienen unidas. Todas rotan con la misma tasa de rotación media como si fuesen la superficie de un cuerpo rígido, durante el tiempo de integración para el que fue calculado el campo de LAVD.

La advección de partículas se realizó a partir de una malla inicial con resolución de $1/32^\circ$. La trayectoria de las partículas se determina utilizando el método Runge-Kutta de cuarto/quinto orden con un paso de tiempo adaptativo y un método de interpolación tricúbico. Los campos de LAVD se calculan a partir de la vorticidad de las partículas advectadas (Ec. 5).

CAPÍTULO II



El proceso de identificación de los remolinos se realizó cada 15 días a partir del 01 de enero de 1993 hasta el 01 de diciembre de 2016. Para cada proceso de identificación se realizó el cálculo de campos de LAVD integrando hacia adelante en el tiempo desde un tiempo inicial t_0 hasta un tiempo de integración final $t=t_0+\tau$, donde τ va desde 15 hasta 120 días en intervalos diarios. El tiempo máximo de integración ($\tau = 120$ d) se fijó por ensayos preliminares que indicaron que los remolinos del NOGoM rara vez alcanzan 120 días de coherencia.

Los remolinos se identificaron siguiendo las recomendaciones de Haller et al. (2016) y de Abernathey y Haller (2018). A continuación, se enlistan los principales pasos y criterios utilizados:

- I. Se detectan los máximos de cada campo de LAVD.
- II. De cada campo de LAVD se extrae el contorno cerrado más externo que satisfaga la tolerancia de convexidad 0.01.
- III. Se descartan los anillos límites con radios menores a 22 km.
- IV. Cada anillo se advecta desde un tiempo t_0 hasta τ . Se consideran como coherentes al tiempo τ los anillos con $L_\tau/L_0 < 1.1$, donde L_0 y L_τ son el perímetro del anillo al inicio y al final de la advección.
- V. Para asegurar que los remolinos se contabilizan una sola ocasión durante su periodo de coherencia, en cada proceso de identificación se verifica que los centroides de los nuevos remolinos detectados estén fuera del anillo frontera de los remolinos detectados en el proceso anterior.

La frontera del remolino es el anillo límite que se obtiene del campo de LAVD calculado con $\tau = 15$ d. De ahora en adelante se le denomina Anillo frontera (A_f). De cada

campo de LAVD con $15 < \tau \leq 120$ d, se determinan anillos límites concéntricos con radios decrecientes hacia el centro. El último anillo que se pueda detectar delimita al núcleo del remolino y se le denomina Anillo de coherencia (A_c) (Figura 3).

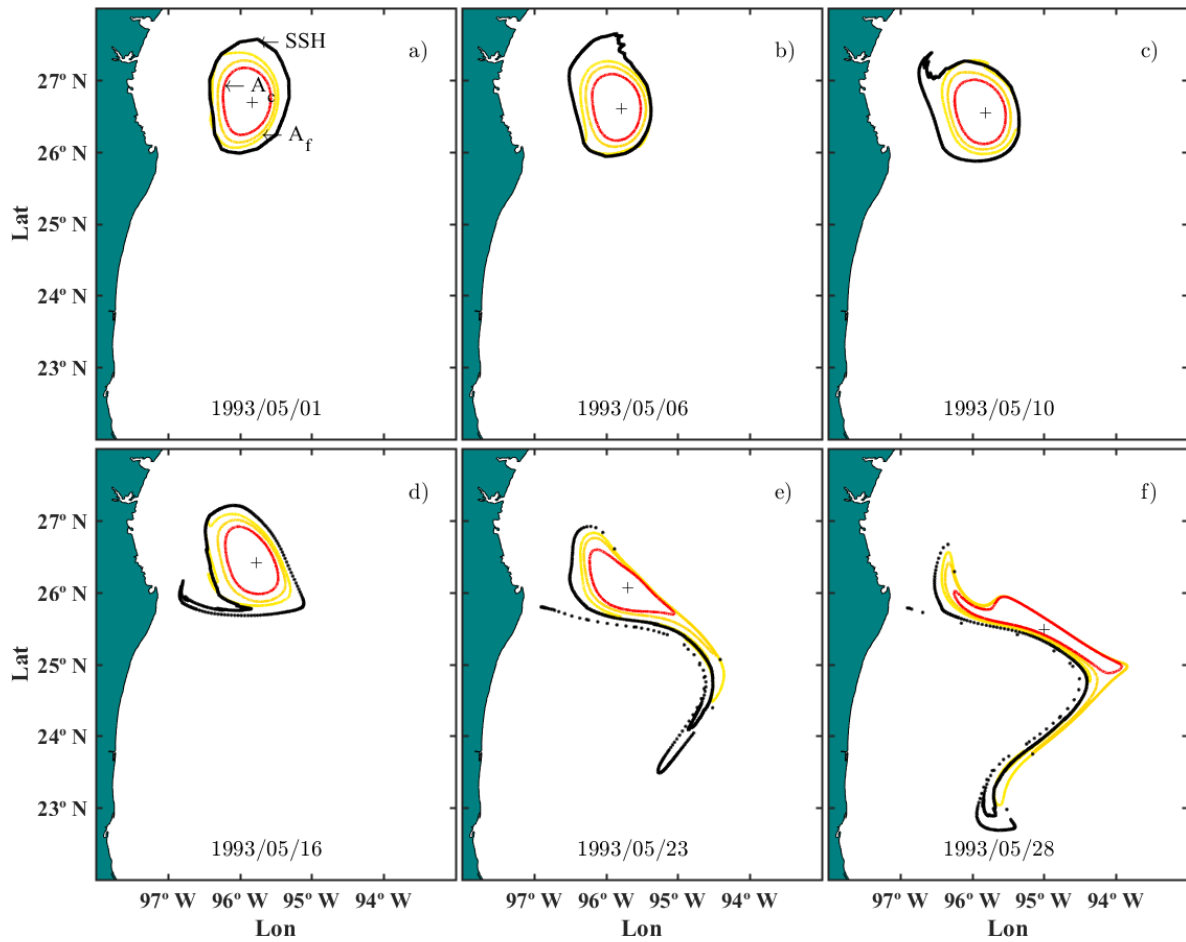


Figura 3. Ejemplo de detección de un remolino ciclónico. La secuencia de (a) a (f) representa al contorno de la altura de la superficie del mar (curva negra) y los anillos límites calculados a partir de los campos de la desviación de la vorticidad Lagrangeana promedio (curvas amarillas). La cruz representa el centroide del anillo de coherencia (curva roja).

II.4.2. Características de los remolinos.

La batimetría puede afectar el comportamiento y las características de los remolinos (Lipphardt et al., 2008). Por ello, para el análisis, el área de estudio se dividió en tres zonas, una somera (zona 1) con profundidades menores a 1000 metros, una intermedia (zona 2) con

CAPÍTULO II



profundidades entre 1000 y 2500 metros, y la zona profunda (zona 3) con profundidades superiores a los 2500 metros (Figura 2).

La posición inicial del remolino se define como el centroide de A_f . Las distancias desde el centroide hasta cada punto de la frontera definen un conjunto de radios que definen sus características. La trayectoria del remolino se obtiene de la posición del centroide del anillo de coherencia para cada instante de tiempo. En este trabajo se consideran solo los remolinos de mesoescala, por lo que el anillo de coherencia deberá ser mayor a ~ 22 km, el radio de deformación de Rossby baroclínico para el NOGoM (Hamilton, 2007).

La velocidad angular, σ , se calcula como (Dong *et al.*, 2011):

$$\sigma = \frac{\text{sign}(\theta)V}{\bar{R}}, \quad \text{Ec. 6}$$

donde θ es el desplazamiento angular, V la velocidad tangencial promedio de las partículas en la frontera del remolino y $\bar{R}$ es el radio promedio. El periodo de rotación es $T = 2\pi/\sigma$.

El tiempo de coherencia de cada remolino corresponde al tiempo τ al cual se obtuvo el A_c . Como ejemplo, en la Figura 3 se muestra la evolución temporal del contorno de SSH, el A_f ($\tau = 15$), un anillo límite para $\tau = 18$, y el A_c ($\tau = 22$) de un remolino del NOGoM desde su detección hasta 5 días después de perder su coherencia. Este ejemplo muestra que el contorno de SSH se filameta rápidamente y que algunas partículas de este contorno se dispersan hacia el oeste, mientras que la parte coherente del remolino detectado con el método LAVD, delimitada por A_c , se mantiene coherente por 22 d. Cuando ocurre la filamentación de A_c (Figura 3f) se hace evidente que el remolino ha perdido su coherencia.

El porcentaje de la masa que se conserva al tiempo de coherencia, L , se estima como:



$$L = \left(\frac{A_{Ac}}{A_{Af}} \right) * 100, \quad \text{Ec. 7}$$

donde A_{Ac} es el área del anillo de coherencia y A_{Af} es el área de la frontera del remolino, el área del remolino al ser detectado. Puesto que los anillos son curvas materiales, esta variable expresa el porcentaje de la masa inicial del remolino que se mantiene dentro de éste durante todo el tiempo de coherencia.

II.5. Resultados

II.5.1. Identificación de remolinos en el NOGoM.

En el análisis de los 23 años se identificaron un total de 254 remolinos en esta región, de los cuales 181 son ciclónicos y 73 anticiclónicos (Tabla 1). Es notorio el predominio de los remolinos ciclónicos que superan a los anticiclónicos en relación 2.5:1. Los remolinos ciclónicos estuvieron presentes el 80.5% del tiempo total del estudio mientras que los anticiclónicos solamente el 27.7% (Tabla 1). Es decir, los remolinos ciclónicos estuvieron presentes casi 3 veces más tiempo que los remolinos anticiclónicos. La relación entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos en la zona 1 es 3.3:1, en la zona 2 la relación es 2.5:1 y en la zona 3 de 1.8:1. La densidad de remolinos por cada 10,000 km² en las zonas 1, 2 y 3 es de 9, 29 y 18 para los ciclónicos, y de 3, 11 y 10 para los anticiclónicos.

Aproximadamente el 31% de los remolinos ciclónicos de la zona 2 se detectaron en un área de 1° × 1°, marcada como Región C en la Figura 2. En esta área ocurren más del doble de los remolinos ciclónicos que se esperarían si la ocurrencia de remolinos fuera homogénea en toda el área. Por su parte, los remolinos anticiclónicos presentan una distribución espacial más uniforme que su contraparte ciclónica. Sin embargo, se observaron tres sectores al este,

CAPÍTULO II



oeste y suroeste de la Región C en los que se observa un mayor número de remolinos anticiclónicos (Figura 4).

Tabla 1. Cantidad y características de los remolinos detectados con un método Lagrangiano en el Noroeste del Golfo de México desde 1993 hasta 2016.

Tipo	Descripción	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Total
Ciclones	Cantidad	35	112	34	181
	Radio Promedio (km)	40.48	53.18	55.53	51.52
	Rango intercuartil (km)	24.17	24.93	48.72	48.72
	Tiempo de persistencia	-	-	-	27.77%
Anticiclones	Cantidad	10	44	19	73
	Radio Promedio (km)	43.6	50.00	68.28	52.80
	Rango intercuartil (km)	20.96	26.89	27.45	28.39
	Tiempo de persistencia	-	-	-	80.49%
Todos	Cantidad	45	156	53	254

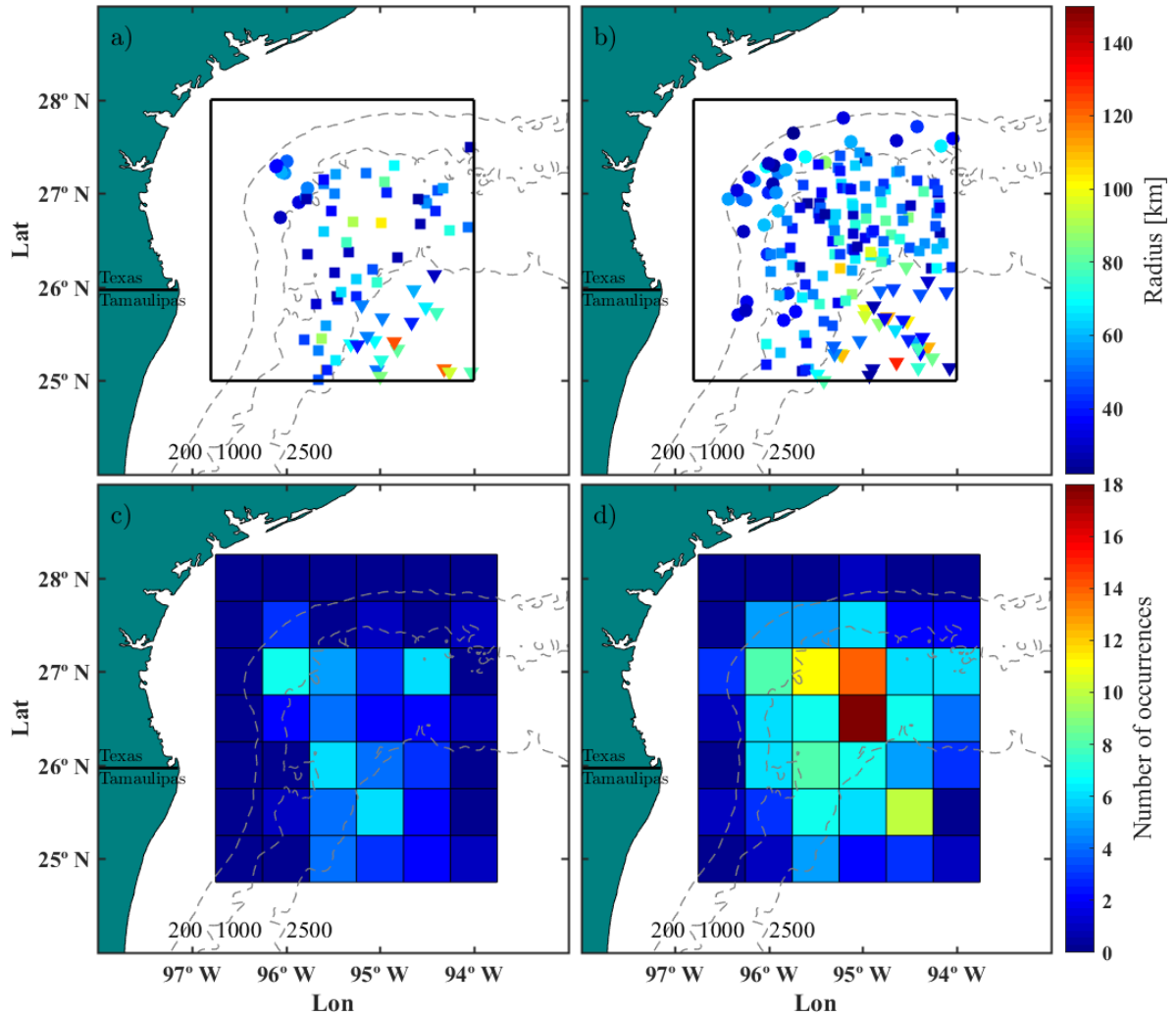


Figura 4. Centroides de anticiclones (a) y ciclones (b) para las zonas 1 (círculos), 2 (cuadrados) y 3 (triángulos) en (a) y (b) la barra de colores indica el radio del remolino. También se muestran el número de anticiclones (c) y ciclones (d) detectados dentro de cajas de $0.5 \times 0.5^\circ$. En (c) y (d) la barra de colores representa el número de remolinos detectados dentro de cada caja.

II.5.2. Estadística descriptiva de remolinos

La frontera de los remolinos detectados con LAVD permite definir el radio como la distancia desde el centroide hasta el límite del conjunto de partículas que se mantienen rotando juntas dentro del remolino. En la zona 1, el 75% de los remolinos tienen radio menor a 54 km. La mediana del radio es de ~ 40 km, aunque existen remolinos ciclónicos que

CAPÍTULO II



alcanzan ~ 90 km de radio. En la zona 2, 75% de los remolinos tiene radio menor a 65 km y la mediana del radio es de ~ 50 km. En contraste, los remolinos anticiclónicos (ciclónicos) de la zona 3 son en promedio ~ 25 (~ 15) km más grandes que los anticiclones (ciclones) de la zona 1 (p -valor < 0.1 para anticiclones y ciclones). Pese a la diferencia entre la mediana de los radios de los ciclones y de los anticiclones de la zona 3, no se detectó diferencia significativa entre ciclones y anticiclones al considerar todos los remolinos de la zona, debido a la variabilidad de los radios de los remolinos. En las Figuras 5a y 4b se puede apreciar que el radio de los remolinos de la zona somera es menor a los de la zona profunda y pareciera indicar una tendencia lineal. Un análisis de correlación lineal entre el radio y la batimetría asociada al centroide del remolino mostró que la batimetría podría tener una influencia moderada en el tamaño de estos ($\rho = 0.35, p\text{-valor} < 0.1$).

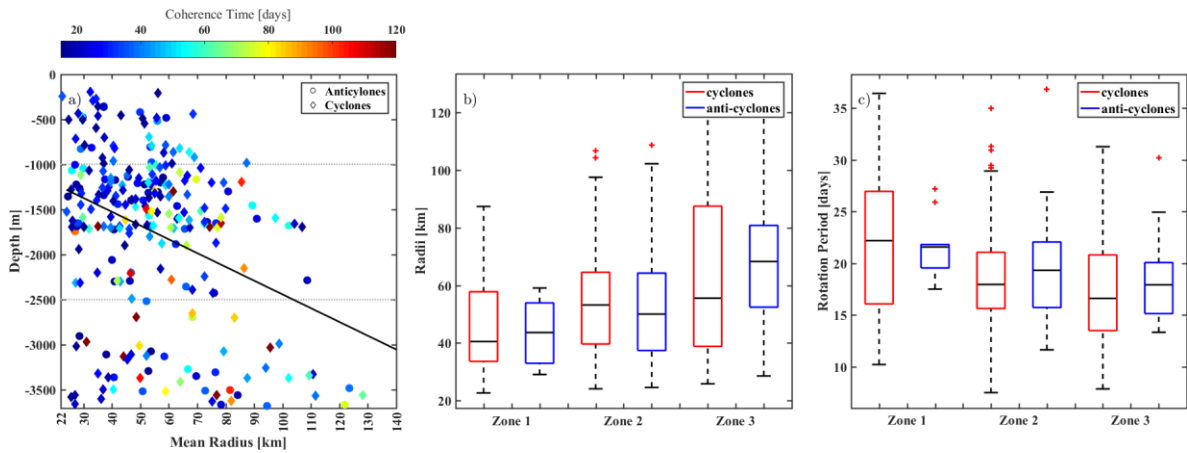


Figura 5. Profundidad correspondiente al centroide de los ciclones (diamantes) y anticiclones (círculos) como función del radio. Las líneas punteadas de color gris delimitan las profundidades para cada zona. La curva de regresión lineal está presentada en negro. **(b)** Diagrama de cajas del radio de los remolinos para cada zona de detección. **(c)** Diagrama de caja de los períodos de rotación de los remolinos para cada zona de detección. La parte superior de cada caja representa el percentil 75 y la parte del fondo de la caja representa el percentil 25; la línea negra dentro de la caja es la mediana, las cruces rojas son los valores aislados. Las barras negras afuera de la caja son el valor máximo y mínimo respectivamente.

CAPÍTULO II



El período de rotación de los remolinos también muestra una diferencia entre la zona somera y la zona profunda ($p - valor < 0.1$), pero con relación lineal baja entre ambos ($\rho = 0.25, p - valor < 0.1$) (Figura 4c). El período de rotación de los remolinos de la zona somera es mayor que el período de rotación de los remolinos de la zona profunda. En promedio los periodos de rotación de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos de la zona 3 son, respectivamente, 7 y 4 días menores que los correspondientes a los remolinos de la zona 1.

El tiempo de coherencia es el tiempo durante el cual el remolino conserva las partículas de su núcleo dentro de él. En el momento que un remolino pierde coherencia, deja de comportarse como un cuerpo rígido y se deforma, en consecuencia, libera o intercambia partículas con el medio que lo rodea. La mayoría de los remolinos detectados tienen tiempos de coherencia menores a 60 días (Figura. 5a). La mediana del tiempo de coherencia de los ciclones aumenta con la profundidad que corresponde a la posición de su centroide, desde 25 días en la zona 1 hasta aproximadamente 44 días en la zona 3 (Figura 6a). Sin embargo, la correlación lineal entre ambas variables para los remolinos ciclónicos fue bajo ($\rho = 0.29, p - valor < 0.1$) En contraste, el tiempo de coherencia de los anticiclones es similar en las tres bandas de profundidad, con una mediana alrededor de los 30 días (Figura 6a).

Los contornos de los remolinos detectados con métodos Lagrangianos, como el utilizado en este trabajo, representan curvas materiales. Si suponemos que el fluido es incompresible, el área delimitada por el contorno del remolino es proporcional a la masa que contiene en su interior. Por lo que, al comparar el área inicial del remolino contra el área del anillo de coherencia (i.e., la relación L), podemos tener una idea de la cantidad de masa que el remolino es capaz de retener durante su periodo de coherencia. En promedio los remolinos detectados

en el NOGoM conservan $\sim 60\%$ de su masa a lo largo de su periodo de coherencia. En general, no hay diferencia entre los remolinos ciclónicos y anticiclónicos excepto en la zona 1 donde los ciclones tienen una ligera tendencia a conservar más masa que los remolinos de las otras zonas ($p - \text{valor} < 0.1$). Por otro lado, los remolinos pequeños tienden a disiparse al perder coherencia, mientras que los remolinos grandes pueden reagruparse y conformar un nuevo remolino que contiene parte de la masa del remolino anterior y agua del entorno.

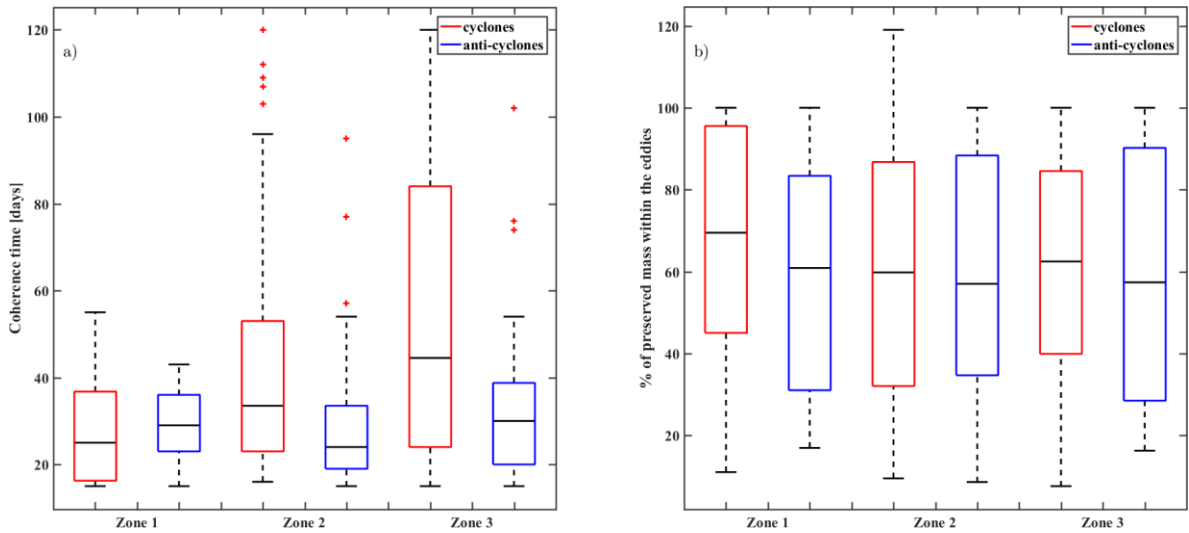


Figura 6. (a) Diagrama de cajas del tiempo de coherencia de los remolinos para cada zona. (b) Diagrama de cajas del porcentaje de masa que conservan los remolinos en cada zona. La parte superior de cada caja representa el percentil 75 y la parte del fondo de la caja representa el percentil 25; la línea negra dentro de la caja es la mediana, las cruces rojas son los valores aislados. Las barras negras afuera de la caja son el valor máximo y mínimo respectivamente.

II.6. Discusiones

II.6.1. Remolinos del NOGoM.

Los métodos Eulerianos suponen que los remolinos de mesoescala, definidos a partir de contornos de SSH o líneas de corriente (Figura 3), atrapan y transportan masas de agua por largos periodos de tiempo, particularmente cuando la velocidad de rotación U (el máximo de las velocidades geostóficas promedio de los contornos cerrados de SSH dentro del remolino;

CAPÍTULO II



Chelton et al., 2011b) domina sobre la velocidad de traslación c , $U/c > 1$ (Chelton et al., 2011). Sin embargo, la masa de agua o partículas contenidas dentro de un remolino pueden atravesar los contornos de SSH (ver Figura 3 y el ejemplo al final del apartado II.5.2.) o de las líneas de corriente (Lipphardt et al., 2008) por lo que la capacidad de los remolinos para transportar partículas podría ser evaluada de manera incorrecta (Beron-Vera et al., 2008). Por lo general, los contornos de los remolinos detectados de manera Euleriana se estiran y se pliegan en el transcurso de un par de semanas, incluso si $U/c > 1$, lo que conlleva a filamentación del remolino (i.e., pérdida de coherencia, Beron-Vera et al., 2013).

La detección de remolinos a partir de métodos Eulerianos está limitada por la resolución de los datos de entrada. Al respecto, Chelton et al. (2011b) y Le Vu et al. (2018) aconsejan descartar remolinos con un radio inferior a 50 km cuando se detectan con datos de AVISO con una resolución de $1/4^\circ$. En contraste, Abernathey y Haller (2018) aplicando la metodología de LAVD, descartan remolinos con radio menor a 15 km a partir de datos de $1/6^\circ$ de resolución y Haller et al. (2016) descartaron los remolinos con radio menor a 20 km a partir de datos de AVISO de $1/4^\circ$. Esto es debido a que el método LAVD no depende de una descripción instantánea de los campos de velocidades o de SSH. Este método se basa en la integral a lo largo del tiempo de la vorticidad de las partículas advectadas (Haller et al., 2016).

Por otra parte, se sabe que los remolinos Lagrangianos coherentes, como los detectados con el método LAVD, generalmente tienen un radio menor que el radio de su contraparte Euleriana (Beron-Vera et al, 2008; 2014; Wang et al., 2016; Abernathey y Haller 2018) (Figura 3). Por lo tanto, para dar una idea de la fiabilidad de la detección de remolinos pequeños con el método LAVD estos se compararon con su contraparte Euleriana, detectada

CAPÍTULO II



a partir de contornos cerrados de SSH. Todos los remolinos Lagrangianos con un radio menor a 50 km tienen un radio Euleriano mayor a 40 km y el 95% un radio mayor a 50 km.

De acuerdo con el análisis realizado, en esta región hay más remolinos ciclónicos que anticiclónicos (2.5:1). Esto es consistente con lo que se puede inferir de las Figuras 3a y 4a de Hamilton (2007). Dentro de la zona 2 se delimitó la Región C en la cual ocurren casi 30% más remolinos ciclónicos que en el resto de la zona (Figura 3, Figura 4d). Esto permite suponer que, si ocurriese un derrame de hidrocarburo en esta región, es ~30% más probable que el hidrocarburo se quede atrapado dentro de un remolino y que sea transportado mientras el remolino mantenga su coherencia. Adicionalmente, los remolinos ciclónicos coherentes tienen la capacidad de atraer partículas con densidad menor a la densidad del agua (Beron-Vera et al., 2014). Específicamente, los centros de LAVD son los atractores en estos remolinos (Haller et al., 2016), y por tanto se puede hipotetizar que un hidrocarburo ligero (densidad igual o menor a la del agua) posiblemente será atraído hacia el centro del LAVD del remolino ciclónico y que dicho hidrocarburo será transportado hasta que el remolino pierda su coherencia.

II.6.2. Características de los remolinos

La definición apropiada de la frontera de los remolinos es una tarea desafiante, ya que depende del criterio que se utilice para hacerlo (e.g., contornos de SSH, líneas de corriente, contornos de temperatura, trayectorias de boyas, etc.). En este estudio, se determinó la frontera del remolino (A_f) y el anillo de coherencia (A_c), el cual coincide con el límite del núcleo del remolino, mediante el uso del método LAVD. En conjunto, estos 2 anillos permiten definir características que son de gran interés, el tiempo de retención y el porcentaje de masa retenida, variables clave en la dispersión de partículas ligeras como hidrocarburos.

CAPÍTULO II



En estudios previos como los de Hamilton (1992, 2007) se indican que algunos remolinos del NOGM pueden tener una duración euleriana de hasta 6 meses, sin contemplar los tiempos de retención/coherencia. Un estudio similar realizado en la costa este de Australia mostró que los tiempos de retención de partículas dentro de los remolinos fueron 24 y 27 días para los anticiclones y ciclones, respectivamente (Cetina-Heredia et al., 2019). Adicionalmente, estudios sobre remolinos que se desprenden de la retroflexión de la corriente de Agulhas mostraron tiempos de coherencia de entre 3 meses y 1 año (Wang et al. 2015) e incluso remolinos con tiempos de coherencia superior a un año y medio (Beron-Vera et al. 2013, Wang et al. 2016). La gran variedad en los tiempos de coherencia permite suponer que no hay un patrón global y que cada zona necesita un análisis particular.

Los remolinos del NOGM conservan ~60% de su masa hasta que pierden su coherencia. Estudios similares han demostrado que los remolinos que se liberan de la retroflexión de la corriente de Agulhas sólo conservan un 30% de la masa que contenían inicialmente (Wang et al. 2015, 2016), lo cual sugiere que los remolinos tienen una capacidad limitada para transportar masa durante su tiempo de vida. Esto refuerza la importancia de estudiar el transporte de masa que realizan los remolinos a partir de métodos Lagrangianos, como el utilizado en este trabajo.

Adicionalmente, se observó en diversas ocasiones la presencia simultánea de varios remolinos. Es posible que algunos de estos casos correspondan con los dipolos/tripolos que han sido descritos en la zona (Merrell y Morrison, 1981, Merrell y Vázquez 1983, Lipphardt et al. 2008). Estas estructuras pueden favorecer la interacción entre remolinos y, en consecuencia, que ocurra pérdida de coherencia. Sin embargo, este tema tendría que ser

CAPÍTULO II



estudiado aparte con la intención de determinar lo que sucede con las propiedades de la masa de agua de los remolinos cuando ocurren dipolos o tripolos.

Estos resultados y su análisis pueden ser de gran interés para la evaluación del transporte en caso de derrames de hidrocarburos o para estudiar el transporte de biota por remolinos en la región. Por ejemplo, conocer los tiempos de coherencia y el porcentaje de masa que conservan los remolinos del NOGM es el comienzo para tomar decisiones asertivas en caso de que ocurra un derrame de hidrocarburos. Por todo esto, la relación entre el radio periférico A_f y su núcleo A_c es una manera práctica para estimar el porcentaje de masa que conserva un remolino desde su detección hasta su pérdida de coherencia. Finalmente, los parámetros de los remolinos que aquí se reportan pueden ser utilizados como base para la validación de modelos numéricos de la circulación del NOGM.

En resumen, la mediana de los radios de los remolinos del NOGM detectados en este estudio varían de ~40 km en la zona más somera a ~70 km en la zona más profunda. Se pudo observar que los remolinos del NOGM retienen aproximadamente el 60% de su masa inicial desde el momento de su detección hasta que pierden su coherencia. También se observó que rara vez los remolinos de la región retienen su masa inicial por más de 60 d. Particularmente, los remolinos ciclónicos de la región, en promedio, retienen su masa inicial por ~33 d, mientras que los anticiclónicos la retienen por ~ 26 d. Por último, existe una región entre 94.75° W y 26.75° N donde se da una mayor ocurrencia de remolinos ciclónicos. En esta región ocurren ~30% del total de los remolinos ciclónicos detectados entre las isóbatas de 1,000 y 2,500 m.



II.6.3. Conclusiones

- La mediana de los radios de los remolinos del NOGoM detectados en este estudio varían de ~40 km en la zona más somera a ~70 km en la zona más profunda.
- Existe una región en 94.75° W y 26.75° N donde se da una mayor ocurrencia de remolinos ciclónicos. En esta región ocurren ~30% del total de los remolinos ciclónicos detectados entre las isóbatas de 1000 y 2500 m.
- Los remolinos de mesoescala del NOGoM retienen aproximadamente el 60% de su masa inicial desde el momento de su detección hasta perder su coherencia.
- Los remolinos ciclónicos de la región en promedio retienen su masa por ~33 días mientras que los anticiclónicos la retienen por ~26 d. Rara vez los remolinos retienen su masa por más de 60 d.
- En caso de que ocurra un derrame petrolero donde se encuentra un remolino coherente, el hidrocarburo quedará retenido dentro del remolino mientras este sea coherente.



CAPÍTULO III: RETENCIÓN DE PARTÍCULAS PASIVAS POR REMOLINOS DE MESOESCALA EN EL NOROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO.

III.1. Introducción

Los remolinos de mesoescala son omnipresentes en el océano. Pueden durar de unos días a varios meses, influyendo en la circulación oceánica. Los remolinos se definen comúnmente como estructuras coherentes cuasi-circulares capaces de transportar agua y biota (Campos, 2018; Cetina-Heredia et al., 2019). Los remolinos influyen sobre el transporte y la retención de partículas (Abernathy y Haller, 2018; Haller et al., 2016), pueden dispersar la clorofila (Chelton et al., 2011a), transportar contaminantes (Korotenko, 2018) y también retener larvas de peces (Condie and Condie 2016; Lobel and Robinson 1988; Sánchez-Velasco et al., 2013). En el Golfo de México (GoM), los remolinos más conocidos son los remolinos que se liberan de la Corriente del Lazo (RCLs), cuyos diámetros pueden ser de 300 km. Los RCLs se separan de la Corriente del Lazo (LC) a intervalos irregulares que van desde 15 días hasta 18 meses. Estos remolinos viajan hacia el oeste hasta llegar a la pendiente de la plataforma continental del oeste del GoM (Lipphardt et al., 2008) y algunos permanecen durante algún tiempo en el noroeste del NOGoM hasta que se disipan (Lipphardt et al., 2008) o se dividen formando nuevos remolinos (Hamilton et al., 1999). Cabe destacar que en el NOGoM, también ocurren remolinos de mesoescala que son independientes de la RCL (Hamilton, 2007), y que hay una región denominada como "Región C" donde ocurren un 30 % más ciclones que en el resto de NOGoM (Bello-Fuentes et al., 2021).

Los remolinos de mesoescala se pueden identificar utilizando datos de altimetría (SSH) o campos de velocidad instantáneos; utilizando un marco de referencia Euleriano o

CAPÍTULO III



Lagrangiano de dichos campos de velocidades. La detección de remolinos utilizando métodos eulerianos derivados de la altimetría a menudo ocultan el verdadero transporte material de estos (Beron-Vera et al., 2013); ya que, aunque los contornos de SSH representan líneas de corriente las partículas pueden cruzarlas, lo que da lugar a resultados erróneos en el cálculo del transporte (Lipphardt et al., 2008). Además, el uso de métodos eulerianos para la detección de remolinos hace que sea difícil determinar el tiempo que los remolinos pueden transportar partículas o masas de agua. Por el contrario, los métodos Lagrangianos que se aplican a datos de altimetría permiten observar eventos de mezcla (Lipphardt et al., 2008), evaluar la capacidad de transporte de los remolinos (Beron-Vera et al., 2013; Haller et al., 2016; Wang et al., 2016) y predecir durante cuánto tiempo un remolino es coherente, i.e., cuanto tiempo es capaz de mantener su masa de agua inicial dentro del límite de remolino sin intercambiarlo con el entorno (Abernathy y Haller, 2018; Haller et al., 2016). Por esta razón, se recomienda utilizar métodos Lagrangianos para evaluar el impacto de los remolinos de mesoescala sobre el transporte o retención de partículas como por ejemplo al analizar la retención de larvas de peces, la dispersión de clorofila o el transporte de contaminantes (Beron-Vera et al., 2013; Haller et al., 2016; Wang et al., 2015, 2016).

Las actividades petroleras están asociadas con eventos de derrames de hidrocarburos. Este contaminante puede ser advectado por las corrientes durante varios kilómetros causando daños a la fauna, flora y daños económicos (Beyer et al., 2016; Solberg, 2012; Sumaila et al., 2012). Particularmente en la Región de Perdido, ha habido un aumento en las actividades petroleras (Durán, 2020) en los últimos años, lo que conlleva un riesgo ambiental y económico para dicha región.



Se han hecho muchos esfuerzos para predecir el destino de los contaminantes en caso de un derrame de petróleo en el océano. Algunos de estos esfuerzos se centran en el modelado numérico (Korotenko, 2018; Paris et al., 2019; Qiao et al., 2019), otros se basan en la información de altimetría (e.g., Alpers et al., 2017; Makafui, 2018). Pero sólo algunos han analizado el efecto de retención y transporte que pudieran ocasionar los remolinos de mesoescala y durante cuánto tiempo puede ocurrir esta retención (Cetina-Heredia et al., 2019; Haller et al., 2016; Korotenko, 2018; Wang et al., 2016). Particularmente, Bello-Fuentes et al. (2021) analizaron la coherencia de los remolinos del NOGoM y determinaron que los remolinos de la región, en promedio, son coherentes por ~30 días y que estos remolinos pueden retener hasta el 60% de la masa que contenían al momento de su detección hasta perder su coherencia. Sin embargo, aún no está claro el impacto que puedan tener los remolinos de mesoescala y las corrientes que estos inducen sobre la persistencia de partículas provenientes de un derrame petrolero en el NOGoM. Por lo tanto el objetivo principal de este capítulo es relacionar la persistencia de partículas pasivas en el NOGoM con los remolinos de mesoescala que ocurren en esta área. Específicamente, se pretende responder si hay patrones de circulación que favorezcan la persistencia de partículas en el NOGoM y si los remolinos coherentes influyen en dicha persistencia. Esta información puede ayudar a entender lo que podría suceder en caso de que ocurra un derrame de hidrocarburos en el NOGoM, puede ayudar a tomar mejores decisiones sobre la planificación espacial de los campos petroleros o la ruta de los tanqueros y adicionalmente puede ayudar a comprender efecto de los remolinos de esta región sobre la distribución de larvas de peces, la dispersión de clorofila.



III.2. Materiales y Métodos.

III.2.1. Datos, advección, y retención de partículas pasivas.

Para identificar los remolinos de mesoescala y determinar su efecto en el transporte de hidrocarburos se realizaron ejercicios de advección de partículas con velocidades geostróficas calculadas a partir de altura de la superficie del mar (SSH, por sus siglas en inglés)

Los datos de SSH se obtuvieron de "Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data" (AVISO <https://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). Estos datos de SSH son un campo diario de topografía dinámica absoluta con una resolución de longitud-latitud de $\frac{1}{4}^\circ$ entre enero de 1993 hasta diciembre de 2015. Las velocidades de las corrientes geostróficas $\tilde{v} = (u, v)$ se calcularon a partir de la topografía dinámica absoluta (η) como:

$$u = \frac{g}{f} \frac{\delta \eta}{\delta y}, \quad v = -\frac{g}{f} \frac{\delta \eta}{\delta x}; \quad \text{Ec. 1}$$

donde g es la aceleración de gravedad, $f = 2\Omega \sin \lambda$ es el parámetro de Coriolis, Ω es la velocidad de rotación angular de la Tierra, $\tilde{x} = (x, y)$ es el vector de posición, y λ es la latitud.

Las trayectorias de las partículas pasivas son las soluciones de la ecuación diferencial

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = \tilde{v}, \quad (\text{Ec. 2})$$

donde $\tilde{x} = (x, y)$ está la posición de las partículas, y t es el tiempo. Las trayectorias fueron calculadas utilizando el método de Runge Kutta de cuarto/quinto orden con un paso de tiempo adaptativo y un método de interpolación tri-cúbica (Bello-Fuentes et al., 2021; Haller et al., 2016).

La cuadrícula inicial (Figura 7) se estableció con una resolución de $1/100^\circ$ para asegurarse de que hay suficientes partículas dentro del dominio durante el proceso de advección. La

CAPÍTULO III



liberación de partículas pasivas se hizo cada 15 días desde enero de 1993 hasta noviembre de 2015. Las partículas fueron rastreadas durante 45 días para cada proceso de advección basado en el tiempo medio de retención de los remolinos que es de ~ 30 días (Bello-Fuentes et al., 2021). Este tiempo de seguimiento es suficiente para determinar el efecto de los remolinos sobre las partículas.

Para cada liberación se calculó el porcentaje diario de persistencia de partículas (PDPP) como la cantidad de partículas que se encuentran dentro del dominio a ese día dividido entre el número total de partículas al tiempo inicial (t_0). Utilizando el PDPP para el último día de seguimiento (45 d) de todas las advecciones, se calcula el histograma del porcentaje de persistencia de partículas dentro del NOGoM (Figura 8), agrupando los porcentajes de partículas en intervalos de 5%. A partir de este histograma, se definieron dos escenarios de persistencia: a) el escenario de bajo porcentaje de persistencia (EBP), el cual contiene aquellas advecciones cuyo porcentaje de persistencia al día 45 es menor que el percentil 25; y b) el escenario de alto porcentaje de persistencia (EAP), que contiene las advecciones cuyo porcentaje de retención al día 45 es mayor que el percentil 75; con el objetivo de relacionar la condición inicial del flujo geostrófico con la posición final de las partículas. Las corrientes geostróficas en t_0 de cada proceso de advección de partículas que pertenezcan al mismo escenario (EBP o EAP) se promediaron para obtener las condiciones medias iniciales.

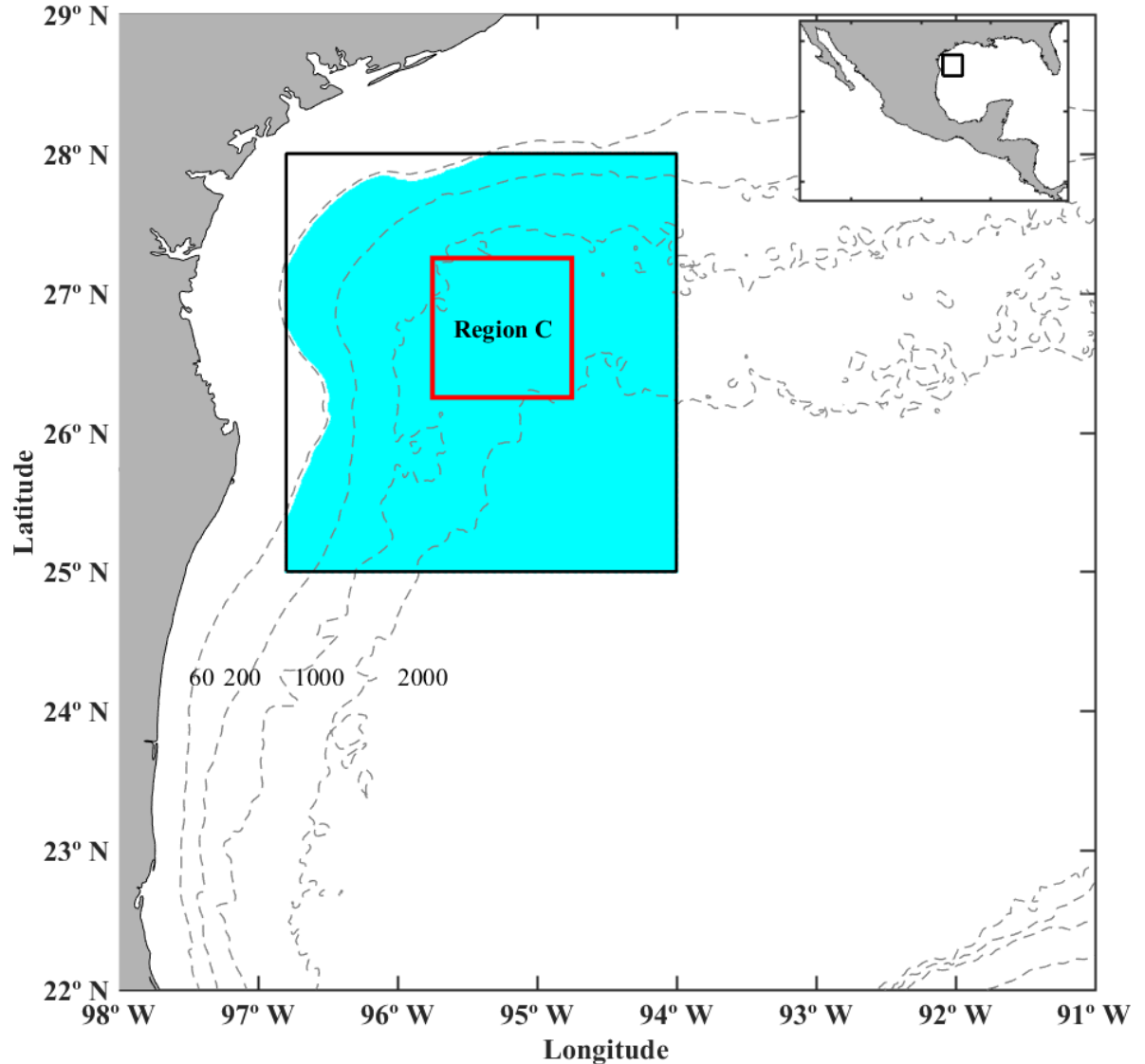


Figura 7. Localización del área de estudio. Se muestran la cuadrícula de partículas advectadas al tiempo inicial (azul), la batimetría del área (líneas segmentadas de color gris) y la Región C (Rojo) identificada por Bello-Fuentes et al. (2021).

III.2.2. Detección de remolinos coherentes de mesoescala.

Un remolino coherente es aquel que no intercambia su masa con su entorno (Haller et al., 2016). Los remolinos coherentes en este trabajo se detectaron utilizando un método que se basa en la cantidad física denominada desviación de la vorticidad promedio Lagrangiana o Lagrangian Averaged Vorticity Deviation (LAVD, en inglés) (Haller et al., 2016). El LAVD

CAPÍTULO III



es un campo escalar objetivo, i.e. independiente del punto de vista del observador, que permite determinar el grupo de partículas que giran juntas como si fueran un cuerpo rígido. A partir de este campo, la curva de contorno más externa que encierra un máximo del campo de LAVD define una curva de material que actúa como barreras al flujo de tal forma que las partículas no pueden cruzarlas (Haller et al., 2016) a menos que pierda su coherencia. El uso de este método permite detectar vórtices coherentes y sus tiempos de retención; y ha utilizado para estudiar la coherencia de los remolinos de Agulhas (Haller et al., 2016), del Pacífico Oriental (Abernathy y Haller, 2018), del GoM (Beron-Vera, et al., 2018a) y recientemente del NOGoM (Bello-Fuentes et al., 2021). Este método ha demostrado ser un método robusto de detección de remolinos. Los detalles de la implementación del método se pueden consultar en la sección II.4.1.

III.3. Resultados: Retención e histogramas.

Se realizaron un total de 557 advecciones para evaluar la persistencia de partículas dentro del NOGoM a partir de datos de altimetría disponibles entre enero de 1993 y noviembre de 2015. La prueba Kolmogorov–Smirnov indicó que la distribución del porcentaje de partículas que persisten en el NOGoM para el día 45 de dichas advecciones (Figura 8) tiene una distribución normal ($p > 0.05$). La mediana de retención es de alrededor del 27%, el percentil 25 es de 19%, y el percentil 75 es 37 %. Los percentiles 25 y 75 indican que 139 casos de 557 tienen una persistencia de partículas dentro del NOGoM inferior al 19%; y mayor al 37% respectivamente.

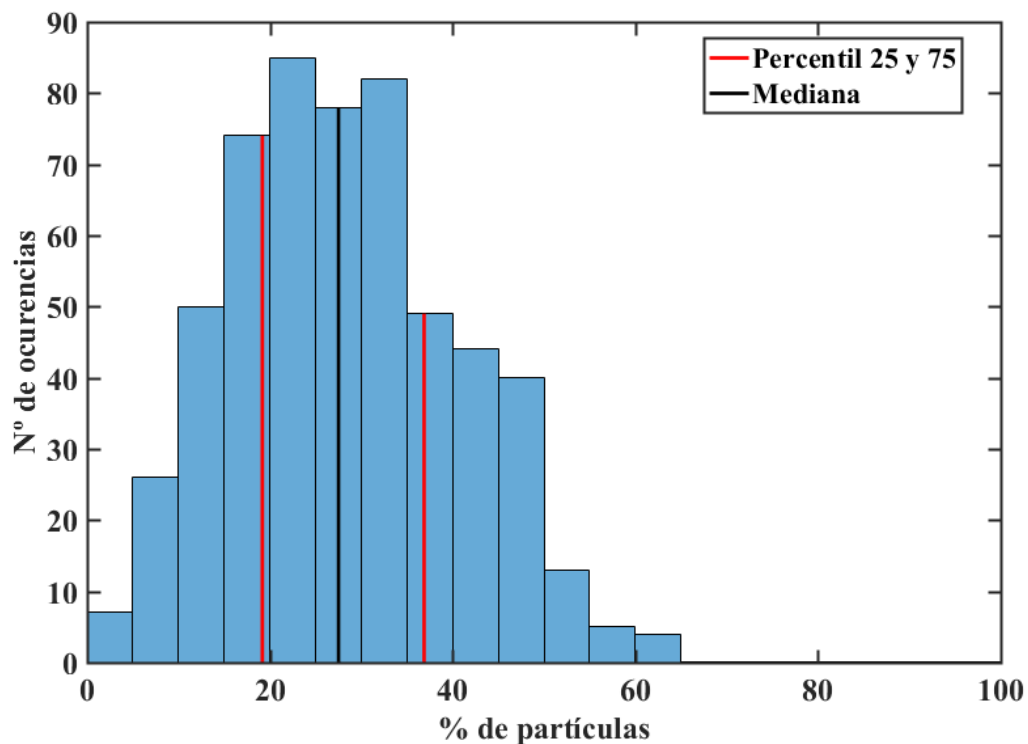


Figura 8. Porcentaje de persistencia de partículas dentro del NOGoM al día 45. Las líneas rojas denotan los percentiles 25 y 75 y la línea negra la mediana.

En el promedio de las corrientes geostróficas para cada escenario (Figura 9) se evidencia la presencia de giros, lo que sugiere que la persistencia de partículas en el NOGoM puede estar asociada a los remolinos. Los escenarios de menor retención (Figura 9a) se asocian con la presencia de un anticiclón en el límite sureste del dominio NOGoM. Este anticiclón coincide con los RCLs que viajan hacia el oeste y se detienen en esa zona hasta que se disipan (Lipphardt et al., 2008) o se dividen en remolinos más pequeños debido a las interacciones de estos con el campo de remolino existente y con la topografía (Hamilton 2007; Hamilton et al., 1999). De acuerdo con Portela et al. (2018) las condiciones hidrográficas en cualquier lugar del GoM dependen de la presencia local de RCLs porque estos remolinos pueden retener y transportar masas de agua hasta 800 metros por debajo de la superficie. Sin

CAPÍTULO III



embargo, los remolinos sólo conservarán y transportarán masas de agua siempre y cuando sean coherentes (Beron-Vera et al., 2018; Haller et al., 2016; Wang et al., 2016). Las observaciones de los anticiclones detectados cerca del límite sureste del NOGoM mostraron un tiempo de coherencia promedio de 27 d, aunque algunos anticiclones pueden alcanzar hasta 120 días (Bello-Fuentes et al., 2021). Mientras que el anticiclón del límite sureste del dominio mantenga su coherencia, las partículas pasivas no ingresarán a este. Por lo tanto, se puede suponer que los remolinos anticiclónicos que se encuentren en esa posición contribuirán a advectar las partículas pasivas hacia el exterior del NOGoM. Al analizar los escenarios de menor retención, también se notó que los remolinos anticiclónicos no coherentes conducen a resultados similares porque son inestables e incapaces de retener partículas en su interior. Es decir, las partículas pasivas logran ingresar al núcleo del remolino pero éstas no son retenidas en su interior, y a medida que el remolino ingresa al NOGoM las partículas son advectadas hacia afuera del NOGoM. La presencia de anticiclones no coherentes sugiere que puede ocurrir un intercambio de partículas entre la costa y el océano profundo. Este supuesto no pudo ser verificado debido a las limitaciones propias de los datos de altimetría cercanos a la costa, sin embargo, los resultados de Guerrero et al. (2020) apoyan esta idea. Ellos demostraron, mediante la implementación de un modelo numérico en el GoM, que la circulación inducida por la interacción de los RCLs con la topografía puede ocasionar un intercambio de partículas entre la plataforma interna y el océano profundo. El intercambio es hacia el océano profundo por el norte del remolino mientras que es hacia la plataforma interna por el sur del remolino.

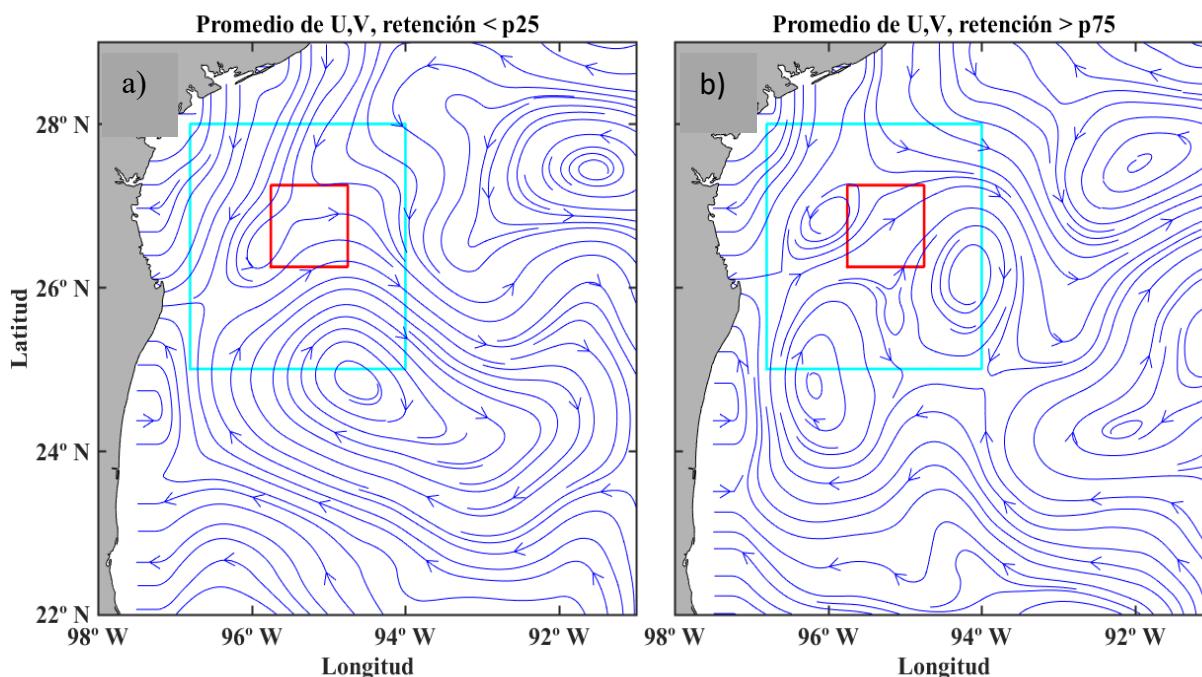


Figura 9. Promedio de corrientes geostroficas para **(a)** los escenarios de baja persistencia de partículas y **(b)** los escenarios de alta persistencia de partículas.

En el EAP (Figura 9b), está presente un ciclón dentro del NOGoM, un anticiclón en el límite este, y un anticiclón situado en el límite suroeste del dominio. El ciclón que aparece en el promedio de las corrientes geostroficas coincide con los reportados por Bello-Fuentes et al. (2021) en la Región C (ver Capítulo II). En general los ciclones de esta zona tienen un tiempo de coherencia mayor que el de la mayoría de los anticiclones del NOGoM. El radio medio de los ciclones en la zona es de entre 40 y 60 km, pero pueden ser tan grandes como 100 km (Bello-Fuentes et al., 2021, ver Capítulo II de este documento). El hecho de que estos remolinos coherentes estén completamente dentro del NOGoM permite la retención de partículas. También se sabe que en esta área se produce un 20% más de ciclones que en el resto del NOGoM, por lo que en caso de un derrame de petróleo, podría haber más de posibilidades de que los contaminantes se queden dentro del NOGoM. El anticiclón del límite este y el anticiclón del límite suroeste parecen contribuir a la retención de partículas actuando

CAPÍTULO III



como una barrera al transporte o redirigiendo a algunas partículas de vuelta al dominio del NOGoM. La inspección de los EAP mostró que cuando el ciclón no está presente, el anticiclón del límite este puede viajar hacia el oeste, entrando completamente dentro del NOGoM. El tiempo medio de coherencia de los anticiclones de la zona es de 27 días (Bello-Fuentes et al., 2021), lo que sugiere que estos remolinos tendrán un efecto similar al de los ciclones en la retención de partículas pasivas.

La Figura 10 ilustra un ejemplo de un escenario de baja retención. En esta figura se muestra el remolino Ulysses (Horizon Marine, Inc) en el momento en que llegó al límite sureste del NOGoM. El remolino Ulises es un RCL que viajó hacia el oeste hasta llegar a la costa oeste del GoM donde se disolvió. El tiempo de coherencia del remolino Ulysses al momento de su detección es de 66 días por lo que no intercambia partículas con el medio que lo rodea durante ese tiempo. En la Figura 10 se observa que una pequeña fracción de las partículas se encuentran dentro de la parte coherente del remolino y estas reingresaron al NOGoM. También se observa que las partículas que están afuera de la parte coherente de este remolino son advectadas hacia afuera del NOGoM. La Figura 11 ilustra un ejemplo de un EAP en el que se detectaron dos remolinos coherentes. El ciclón que está completamente dentro del NOGoM tiene una coherencia de 110 d. El anticiclón situado en el límite este del NOGoM tiene un tiempo de coherencia de 49 d. Ambos remolinos tienen un radio medio de ~100 km. El ciclón retiene la mayoría de las partículas. Como se puede observar, una pequeña fracción de las partículas quedaron atrapadas por el anticiclón y estas retornaron al dominio mientras que otras son advectadas hacia afuera del dominio por las corrientes.

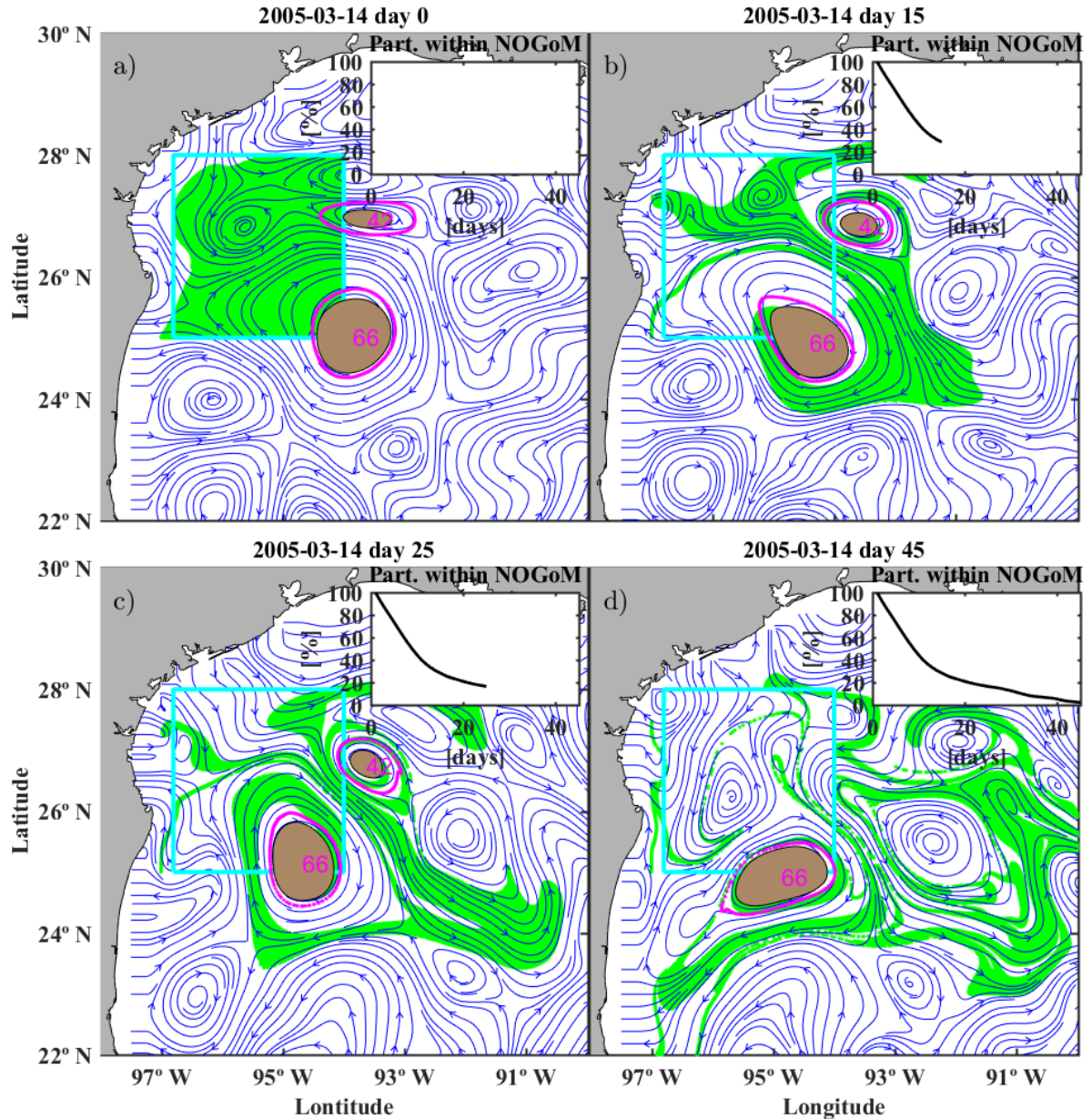


Figura 10. Advección y seguimiento de partículas desde el 13 de marzo de 2005 hasta 45 días después (secuencia a-d). El cuadro cian denota el dominio analizado, las líneas azules son las líneas de corriente. Las partículas advectadas se presentan en color verde y el núcleo de los remolinos es el área café sólida. Los números en magenta representan los días de coherencia del remolino. Dentro de cada subgráfico se muestra el porcentaje de partículas que se encuentra dentro del dominio analizado.

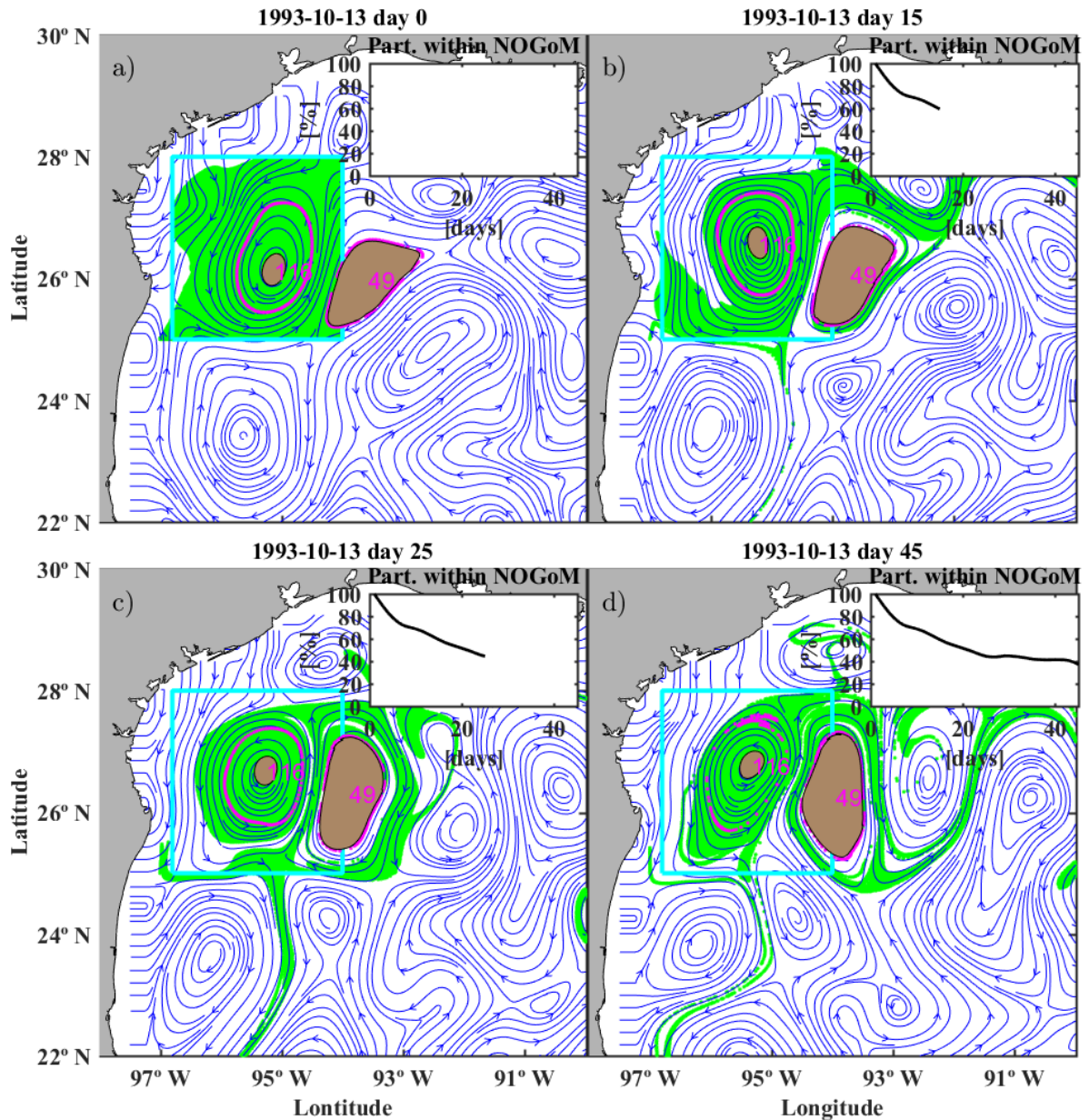


Figura 11. Advección y seguimiento de partículas desde el 13 de octubre de 1993 hasta 45 días después (secuencia a-d). El cuadro cian denota el dominio analizado, las líneas azules son las líneas de corriente. Las partículas advectadas se presentan en color verde y el núcleo de los remolinos es el área café sólida. Los números en magenta representan los días de coherencia del remolino. Dentro de cada subgráfico se muestra el porcentaje de partículas que se encuentra dentro del dominio analizado.



III.4. Discusiones y conclusiones.

La retención de partículas está muy influenciada por remolinos como los RCL y los remolinos ciclónicos de la región C. Los escenarios de menor retención de partículas ocurren cuando hay un RCL en el sureste del dominio del NOGoM. La presencia del RCL coherente en esa posición favorece la advección de partículas hacia afuera del NOGoM, sugiriendo que el ecosistema costero y las actividades económicas en la costa tal vez no se vean afectadas durante un derrame petrolero. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que arriben partículas a la costa por las corrientes inducidas por la interacción de los RCLs con la topografía. Esta idea se apoya en los resultados obtenidos por Guerrero et al. (2020) en el GoM. Ellos muestran que las corrientes inducidas por la interacción de los RCLs con la topografía generan intercambios de partículas entre la zona costera y el océano profundo. Esta idea también se apoya en el estudio realizado por Korotenko (2018) en el Mar Negro. Dicho estudio describe el impacto de los remolinos de mesoescala en el comportamiento de los derrames de hidrocarburos en esa región y concluye que el remolino anticiclónico cerca de la costa del Cáucaso puede capturar contaminantes durante su paso por el Mar Negro para luego liberarlos cerca de la costa cuando se inestabiliza (pérdida de coherencia). Los escenarios de mayor retención de partículas ocurren cuando hay un remolino coherente que está completamente dentro del dominio NOGoM y además no está presente el remolino en la frontera sureste del dominio. Se sabe que los remolinos del NOGoM tienen una coherencia de ~ 30 d, por lo tanto si ocurre un derrame de hidrocarburos cuando un remolino se encuentra totalmente adentro de esta área, el hidrocarburo que se encuentre en la capa subsuperficial quedará atrapado por el remolino hasta que éste pierda su coherencia.

CAPÍTULO III



El viento puede tener un efecto sobre la persistencia de partículas dentro del NOGoM. Se sabe que en general el viento en el GoM tiene dirección hacia el oeste la mayoría del tiempo (Zavala-Hidalgo et al., 2014), por lo tanto es posible que la capa de hidrocarburos que flota sobre la superficie del océano sea arrastrada por el viento hacia el oeste y en consecuencia que hayan arribos de hidrocarburos hacia las costas. Este tema en particular se discute en el Capítulo IV de este trabajo de tesis.

Los resultados de este capítulo sirven para ampliar la comprensión de lo que podría suceder en la capa subsuperficial en caso de un derrame de petróleo en el NOGoM. En particular, puede ayudar a tomar mejores decisiones sobre la planificación espacial de los campos petroleros o la ruta de los tanqueros. También puede ser de utilidad para entender el efecto de los remolinos del NOGoM sobre la advección horizontal de clorofila, la distribución de larvas de peces, propiedades o seguimiento de contaminantes.

Este trabajo también puede servir como referencia para inferir a priori el destino de los derrames de hidrocarburos en otros lugares (por ejemplo, el suroeste del Golfo de México (SOGOM)). Si estos resultados se extrapolaran al SOGoM podría esperarse lo siguiente: a) si un remolino se encuentra en el límite noreste, habría advección hacia la costa del SOGoM. b) Si el remolino está completamente dentro del SOGoM, las partículas se mantendrán dentro de esta región. c) Se podría esperar que el ciclón semipermanente de Campeche pudiera retener partículas de manera similar a los remolinos de la Región C, pero esto dependerá de su tiempo de coherencia.



CAPÍTULO IV: PROBABILIDAD DE ARRIBO DE HIDROCARBUROS A LAS COSTAS FRENTE A LA REGIÓN DE PERDIDO EN CASO DE DERRAME PETROLERO

IV.1. Introducción.

El desarrollo de actividades petroleras en el océano tiene asociado un riesgo de que ocurran derrames de hidrocarburos. Por ejemplo el derrame del Deepwater Horizon en el Golfo de México (Solberg, 2012) causó daños a peces, corales, tortugas y cetáceos (Beyer et al., 2016) además de daños económicos significativos, como por ejemplo el cierre de pesquerías (Sumaila et al., 2012).

Determinar la trayectoria que tendrá un derrame de hidrocarburos es una tarea desafiante ya que esta depende de la acción combinada de diferentes elementos: corrientes oceánicas, los vientos, el oleaje y las mareas (Qiao et al., 2019; Spaulding 2017). La mejor manera de predecir cual será la trayectoria de un derrame de hidrocarburos es mediante el uso de modelos numéricos que consideren los elementos mencionados anteriormente (Toz y Koseoglu, 2018). Particularmente, los modelos que utilizan métodos Lagrangianos han mostrado un mejor desempeño que su contraparte Euleriana al reproducir casos reales de derrames de hidrocarburos (Makafui 2018; Qiao et al., 2019) o del seguimiento de otras partículas (Lipphardt et al., 2008; Beron-Vera et al., 2015; Coulliette et al., 2007; G. Haller et al., 2016)

La circulación del NOGoM está influenciada principalmente por el viento, por la extensión norte de una corriente de frontera oeste persistente que fluye anticiclónicamente a lo largo de la plataforma continental y por los remolinos de mesoescala presentes en esta

CAPÍTULO IV



región. Particularmente, la circulación en la plataforma interna es inducida principalmente por el efecto del viento y las descargas de los ríos; mientras que la circulación en aguas profundas es dominada principalmente por la influencia de la CL y los remolinos de mesoescala que se desprenden de esta (Oey et al., 2005; Ohlmann et al., 2001). La circulación general del NOGoM fue explicada con más detalle en la sección I.1. de este trabajo y las características de los remolinos del NOGoM y el impacto que tienen sobre la persistencia de partículas provenientes de un derrame de hidrocarburos dentro de este fueron descritas en los capítulos II y III del presente trabajo.

En el NOGoM se desarrollan actividades petroleras que, conllevan un riesgo ambiental y económico asociado a la posibilidad de ocurrencia de derrames de gran escala. Por ello, este capítulo se enfoca en determinar la probabilidad de arribo de hidrocarburos a las costas del NOGoM (Tamaulipas, Texas y Luisiana) debido a las corrientes y el viento prevalecientes en la zona mediante el uso de un modelo numérico. Cabe destacar que en la costa de Tamaulipas-Texas se encuentra la Laguna Madre el cual es un ambiente vulnerable. La Laguna Madre es un humedal de importancia internacional, de categoría Ramsar (www.ramsar.org), que es zona de anidación de tortugas. Además en dicha costa se realizan diferentes actividades económicas como por ejemplo pesca y acuicultura de camarón (SE, 2016) y un derrame de hidrocarburos podría causar un impacto social y económico.

IV.2. Datos y métodos.

Para determinar la probabilidad de arribo de hidrocarburos a las costas del NOGoM se realizó un análisis Lagrangiano a partir de la implementación de un modelo oceánico. A continuación se describe la configuración de dicho modelo y la metodología para simular y estudiar los derrames de hidrocarburos.

CAPÍTULO IV



IV.2.1. Configuración del modelo.

El modelo numérico Regional Oceanic Modeling System (ROMS) fue implementado para modelar el NOGoM (23° a 30° N y de los 92.5° a 98° O) desde 1996 hasta 2006. Esta área comprende la zona costera y la zona oceánica frente a Tamaulipas (México), Texas y parte de Luisiana (Estados Unidos) (Figura 12). La malla numérica tiene una resolución de 1.5 km en la horizontal y 36 niveles sigma en la vertical. Los forzamientos atmosféricos utilizados provienen de Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) de The National Center for Environmental Prediction (NCEP) y se suministraron a ROMS con una resolución temporal de una hora. La batimetría utilizada para generar la malla es un compuesto generado por el grupo de modelación oceánica y atmosférica del departamento de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, Zavala-Hidalgo) y tiene una resolución de $1/100$ de grado. Los forzamientos de los ríos fueron generados por el grupo de simulación del Centro de Investigación Científica y Educación Superior (CICESE), con una resolución de un día. Los forzamientos de frontera se generaron con las salidas de una configuración de ROMS para el GoM con una resolución de 5 km entre las longitudes 97.7° a 79° W y los 15.6° a 30.54° N.

La implementación de ROMS de 5km, utilizada para generar las condiciones de frontera el modelo utilizado en este trabajo, utiliza los mismos forzamientos atmosféricos. La batimetría es un compuesto de diferentes datos provenientes principalmente de GEBCO (General Bathymetry Chart of the Oceans) y de la NOAA. Se utiliza el forzamiento de la descarga de 19 ríos con datos de la climatología de CICESE, con una resolución temporal de un día y en las fronteras se utilizan datos horarios del reanálisis GLORYS2 versión 3, del grupo MERCATOR Ocean Group.



IV.2.2. Simulaciones de derrames.

Se realizaron simulaciones de derrames de hidrocarburo mediante la liberación de partículas en tres puntos de interés (Figura 12). Se liberaron 4000 partículas en cada punto cada 5 días durante los años de 1996 a 2006. La advección de partículas se realizó con el método de integración Runge Kutta de cuarto orden con interpolación bicúbica. Para considerar a advección ocasionada tanto por las corrientes superficiales como por el arrastre del viento, se definió una velocidad advectiva $u_a = u_c + C_v u_v$, donde u_c es la velocidad de la corriente superficial (simulada con el modelo ROMS), u_v es la velocidad del viento a 10 metros (corresponden a la base de datos CFSR con la que se forzó dicho modelo) y C_v es un coeficiente que define el arrastre directo por viento. Abascal et al. (2009) demostraron que C_v es linealmente proporcional a la velocidad del viento a 10 m y que este varía entre 0.02 a 0.04; otros autores han utilizado valores de C_v entre 0.01 a 0.04 (Churchill and Csanady, 1983; Kim et al., 2014; Perrie et al., 2003; Wu, 1983). Observaciones recientes muestran que en presencia de hidrocarburos en la superficie del océano el arrastre por viento puede disminuir ocasionando que el viento sea entre 50-100% menos efectivo que en ausencia de hidrocarburos (Shen et al., 2019). En este trabajo se realizaron tres ejercicios de advección de partículas: uno sin efecto de arrastre directo del viento ($C_v = 0$), y dos ejercicios donde se utilizaron $C_v = 0.01$; y 0.03, respectivamente.

El dominio numérico fue discretizado en celdas de 20 x 40 km en longitud y latitud, respectivamente. En cada liberación de partículas se realizó un conteo diario del número de partículas por celda durante los 40 días de seguimiento del derrame y se calcularon dos parámetros de utilidad: El tiempo mínimo de arribo (TMA), y el porcentaje máximo de arribo (PMax). Estos dos parámetros son utilizados en los estudios que caracterizan el

CAPÍTULO IV



comportamiento de derrames de hidrocarburos (e.g., El-Sayed y Awad 2012; Garcia 2020) por que ayudan a identificar las regiones a las cuales las partículas pueden aproximarse rápidamente y donde podría haber arribo de una gran cantidad de hidrocarburo. El TMA se define como el tiempo mínimo que tarda una partícula en llegar a una localidad desde el sitio del derrame. El PMax es el máximo del porcentaje diario de hidrocarburo que pudiera llegar a dicha localidad. El porcentaje de partículas en cada celda se obtiene al dividir el número diario de partículas que se encuentran en una celda entre el total de partículas liberadas.

Para determinar la variabilidad temporal de la probabilidad de arribo a la costa se realizó la climatología mensual de los 10 años simulados con el modelo ROMS. La climatología mensual consiste en promediar la cantidad de partículas que arriban a la costa durante cada mes en el transcurso de 10 años para cada uno de los puntos de liberación.

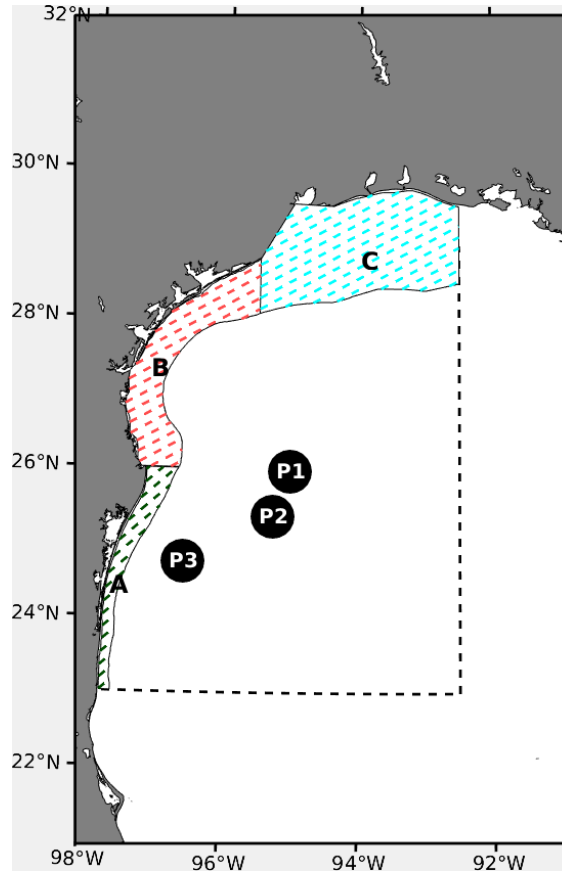


Figura 12. Área de estudio. Las líneas segmentadas delimitan el dominio numérico, las áreas asuradas denotan la división de la zona costera en las áreas A, B y C y círculos negros indican los puntos de liberación de partículas denominados P1, P2 y P3.

IV.2.3. Estructuras Coherentes Lagrangianas Persistentes.

Para entender los mecanismos de transporte de partículas así como las causas que favorecen su arribo a una región, es muy útil identificar las barreras dinámicas al transporte. (líneas materiales que las partículas no pueden atravesar). No es suficiente con determinar las líneas de corriente, ya que es común que las trayectorias de las partículas crucen estas líneas (Lipphardt et al., 2008). Trabajos recientes han demostrado que las Estructuras Coherentes Lagrangianas (LCSs, por sus siglas en inglés) son líneas materiales, por lo que las partículas no pueden atravesar estas líneas y permiten identificar la estructura del flujo.

CAPÍTULO IV



Sin embargo, las LCSs pueden variar con el tiempo, por lo que para estimar de manera objetiva las regiones donde las LCSs se encuentran la mayor parte del tiempo, se utiliza una técnica conocida como LCSs persistentes (pLCSs) (Maslo et al., 2020).

Para el cálculo de las pLCSs primero se debe definir la matriz de Cauchy-Green (CG) y el concepto de las LCSs. Basado en la técnica de Haller y Beron-Vera (2012), se considera el campo de velocidad inestable e incompresible $u(t, x)$ dado en un intervalo de tiempo finito $[t_0, t_0+T]$, la ecuación de movimiento correspondiente para el fluido es

$$\dot{x} = u(t, x).$$

Denotamos el mapa de flujo asociado por F^{t_0+T} , que asigna valores iniciales x_0 en el tiempo t_0 a su posición respectiva en el tiempo $t_0 + T$. Entonces, es posible definir el campo de tensión Cauchy–Green (CG) como:

$$C^{t_0+T}(x_0) = (\nabla F^{t_0+T}(x_0)) * \nabla F^{t_0+T}(x_0),$$

donde ∇ indica el Jacobiano, y el asterisco indica la transpuesta de la matriz. Los autovectores y autovalores de C^{t_0+T} caracterizan la magnitud y dirección del estiramiento máximo y mínimo en el flujo. Donde los autovalores $\lambda_i(x_0)$ satisfacen lo siguiente:

$$C^{t_0+T}(x_0)\xi_i(x_0) = \lambda_i(x_0)\xi_i(x_0), |\xi_i(x_0)| = 1, \dots i = 1, 2;$$

$$0 < \lambda_1(x_0) < \lambda_2(x_0), \xi_1 \perp \xi_2.$$

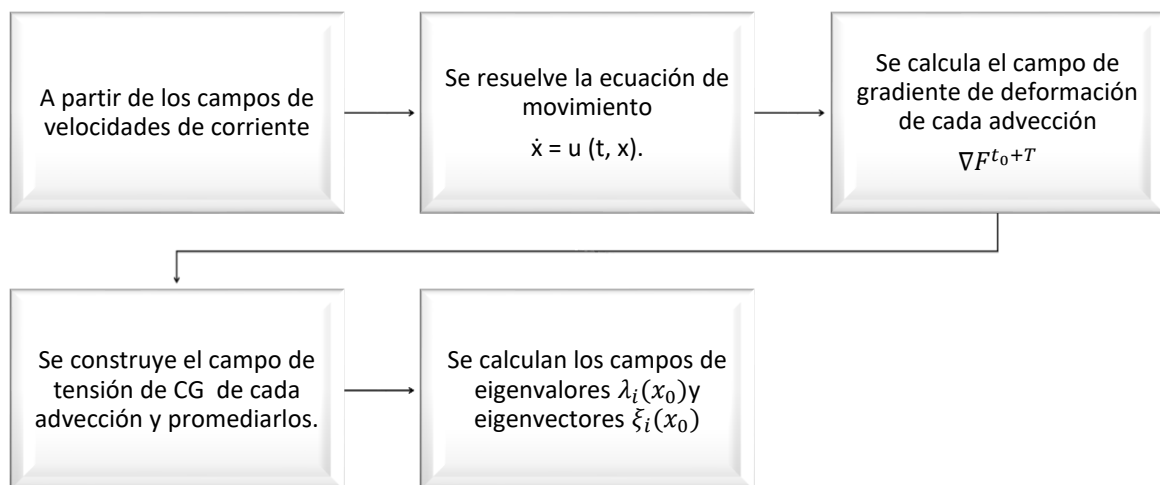
Donde λ_2 indica las regiones de máximo estiramiento por lo que permite identificar las regiones donde pueden encontrarse las barreras de transporte. La LCSs se encuentran contenidas en las curvas r que se obtienen de integrar

$$dr/ds = \xi_1(r).$$



Las LCSs son las curvas γ que tienen autovalores λ_2 mayores que 1. Como se mencionó anteriormente, las LCSs son líneas materiales, esto significa que las partículas no pueden cruzar estas líneas. Cuando se calcula la matriz de CG hacia atrás en el tiempo se obtiene las LCSs atractoras. Si el cálculo se realiza hacia adelante en el tiempo, se obtienen las LCSs repelentes. Las partículas cercanas a las LCSs atractoras se aproximan a estas curvas materiales y viajan siguiéndolas sin cruzarlas. Esto permite estimar con cierta precisión las posibles trayectorias de las partículas. Para determinar los sitios donde las LCSs se encuentran de forma persistente durante un periodo de tiempo dado, se calculan las pLCSs. Esto se hace calculando la matriz CG para cada instante de tiempo comprendido en el periodo y se realiza el promedio de las matrices de CG calculadas (mCG). Los autovalores y autovectores de esta matriz CG promedio caracterizan la magnitud y dirección del estiramiento máximo en el flujo promedio e indican donde pueden encontrarse las barreras de transporte más persistentes en el periodo de interés.

El siguiente esquema explica de forma resumida el procedimiento para calcular las pLCSs:



CAPÍTULO IV



IV.3. Resultados.

La zona costera en este trabajo se define como la región con profundidad menor a 50 metros. Además, con base en análisis preliminares, la zona costera se divide en 3 regiones de arribo A, B, y C (Figura 12), delimitadas hacia el océano por la isobata de 50 metros. La zona A (Tamaulipas) se encuentra delimitada entre las latitudes 23.5 y 25.5°N, la zona B (Sur de Texas) está delimitada con latitudes mayores e igual a los 25.5°N y con longitud menor que 95°O. Finalmente, la última región C (Texas-Luisiana) es la región entre longitudes mayores que 95°O y menores e iguales que 93.5°O.

IV.3.1. Evolución de los derrames probabilísticos.

En las Figura 13-Figura 15 se muestran los promedios del PMax (paneles superiores) y del TMA (paneles inferiores) para los 10 años, para los puntos de liberación P1, P2 y P3 respectivamente; y para las tres condiciones de arrastre por viento analizadas: sin arrastre $C_v=0$ (paneles de la izquierda), $C_v=0.01$ (paneles centrales) y $C_v=0.03$ (paneles de la derecha). También se muestra la trayectoria promedio de todas las partículas liberadas (línea negra) en cada sitio y las elipses de variabilidad de la posición de las partículas para tres tiempos, $t=5$ (línea azul), 15 (línea cian), y 25 días (línea verde). Cada elipse se dibuja centrada en el centro de masa de las partículas a ese tiempo (círculos azul, cian y verde) mismos que, por definición, se ubican sobre la trayectoria promedio.

En general, el tiempo mínimo requerido para que las partículas lleguen a un punto aumenta casi radialmente alrededor de la zona de derrame. De manera similar, el porcentaje máximo decae radialmente al alejarse del punto de liberación. En ausencia de arrastre por viento, $C_v=0$, el PMax tiene valores muy bajos cerca de la costa y el TMA es mayor a 20 d. La orientación de la trayectoria media es hacia el este, y las elipses de variabilidad son casi

CAPÍTULO IV



circulares indicando una gran variabilidad en las trayectorias que pueden tener las partículas. Al considerar el arrastre por viento, $C_v=0.01$ y $C_v=0.03$, el porcentaje de partículas que arriba a la costa aumenta conforme se incrementa el coeficiente de arrastre por viento, alcanzando valores entre 3.5 y 4% en la región cercana a la costa de Texas. De manera similar el tiempo de arribo de las partículas que se aproximan a la costa disminuye al aumentar C_v , alcanzando la costa en periodos entre 10 y 15 d. La orientación de la trayectoria media cambia al incluir el arrastre por viento. La trayectoria promedio cuando no se considera el arrastre por viento ($C_v=0$) es hacia el este, cuando $C_v=0.01$ la trayectoria promedio es hacia el norte, mientras que con $C_v=0.03$ la trayectoria promedio tiene una orientación hacia el noroeste. Las elipses de variabilidad son semicirculares excepto la elipse del día 5 con $C_v=0.03$ que es más alargada con orientación noreste-suroeste, lo que indica que existe una mayor tendencia de las partículas a moverse en esta dirección.

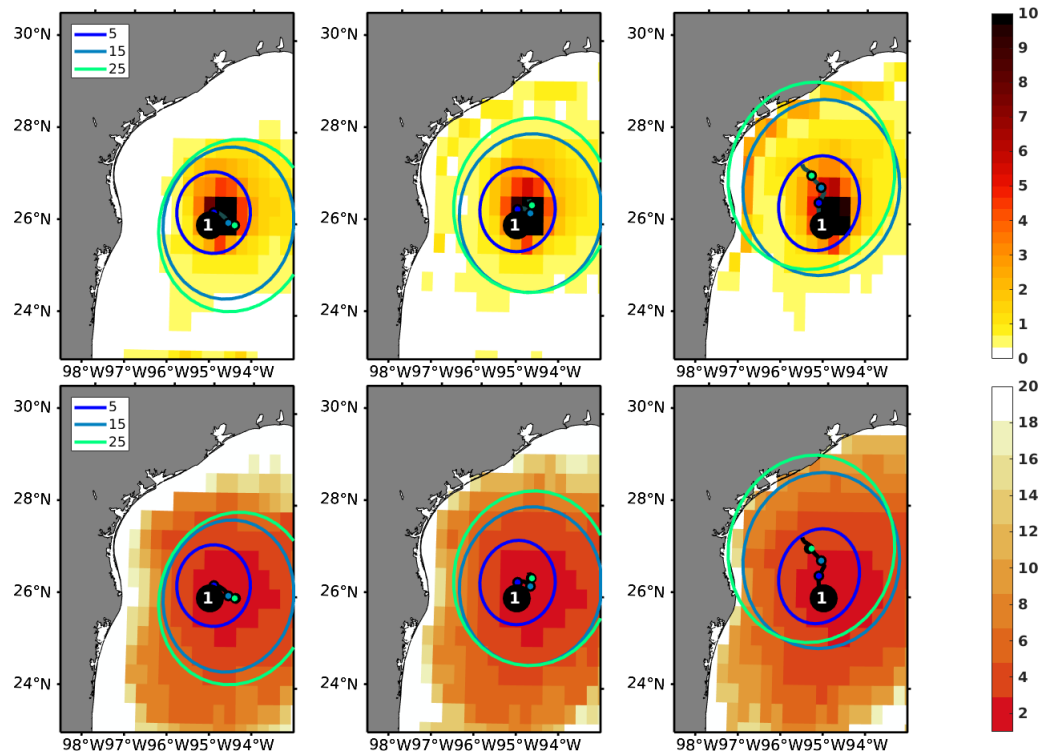


Figura 13. Promedio del Porcentaje Máximo de partículas (paneles superiores) y del Tiempo Mínimo de Arribo (paneles inferiores) para los 10 años de estudio, para el punto de liberación P1 y para las tres condiciones de arrastre por viento analizadas: sin arrastre $C_v=0$ (paneles de la izquierda), $C_v=0.01$ (paneles centrales) y $C_v=0.03$ (paneles de la derecha). Se muestran la trayectoria promedio (línea negra) y las elipses de variabilidad de la posición de las partículas para tres tiempos, $t=5$ (línea azul), 15 (línea cian), y 25 días (línea verde). Cada elipse se dibuja centrada en el centro de masa de las partículas a ese tiempo (círculos azul, cian y verde).

Cuando sólo se consideran las corrientes, el promedio de PMax en P1 (Figura 13) indica que en general las partículas no llegan a la costa y en caso de llegar, estas pueden tardar más de 20 días en hacerlo. Cuando se considera el efecto del viento el PMax aumenta y el TMA disminuye a ~ 10 d. Esto es más evidente en el área de las costas de Texas.

El punto de liberación P2 (Figura 14), se puede ver que tanto el tiempo como el porcentaje de arribo son muy similares a los descritos para el punto de liberación P1 (Figura 13) en las tres condiciones de arrastre de viento. Las trayectorias medias en P2 tienen una componente

norte más marcada que las de P1, esto se refleja en la orientación de las elipses de variabilidad, sobre todo en las elipses calculadas a los 5 d.

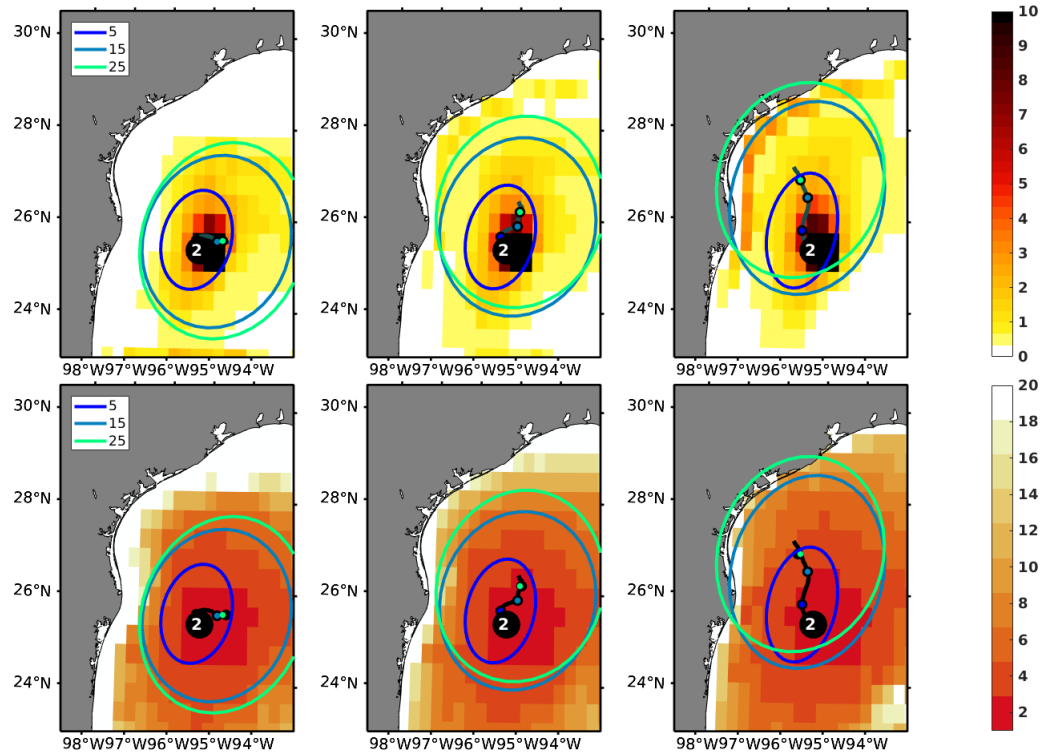


Figura 14. Igual que la Figura 13 pero para el punto de liberación P2.

El porcentaje máximo de partículas que se aproximan a la costa en el punto de liberación P3 (Figura 15) aumenta considerablemente en comparación con las zonas P1 y P2 (Figura 13 y Figura 14), para los tres experimentos con $C_v=0, 0.01$ y 0.03 . Al aumentar el arrastre por viento el porcentaje de partículas que arriba cerca de la costa aumenta, sobre todo en la zona del sur de Texas. En ausencia de arrastre por viento el tiempo mínimo de arribo cerca de la costa es entre 5 y 15 d, aumentando de sur a norte. Al incluir arrastre por viento el tiempo de arribo disminuye, principalmente en la zona cercana a la costa sur de Texas a donde arriban partículas en aproximadamente 10 d. Las trayectorias medias tienen la misma dirección a la

de los casos anteriores; hacia el este ($C_v=0$), hacia el norte ($C_v=0.01$) y hacia el noroeste ($C_v=0.03$).

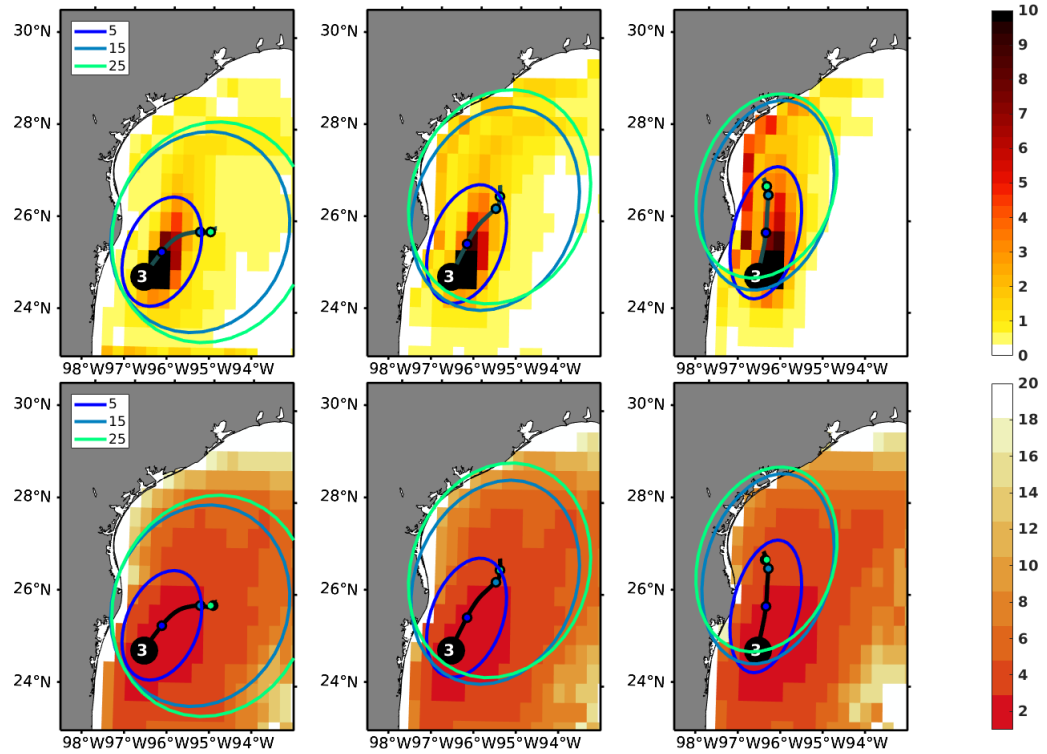


Figura 15. Igual que la Figura 13 pero para el punto de liberación P3.

Es de esperarse que considerando solamente la corriente superficial (sin arrastre por viento), la trayectoria promedio de las partículas sea hacia el este, debido a la influencia de la corriente de frontera que fluye en esta dirección. En cambio, cuando se considera el arrastre por viento, la trayectoria de las partículas depende tanto de la acción de la corriente de frontera que va hacia el este, como de la acción del viento cuya dirección promedio es hacia el oeste.

IV.3.1.1. Variabilidad temporal de un derrame probabilístico.

En las Figura 16-Figura 18 se presenta el porcentaje máximo de arribo para las zonas de liberación P1, P2 y P3, respectivamente. En estas figuras, los paneles de la izquierda son los

CAPÍTULO IV



promedios para los meses de invierno (definido en este trabajo como el periodo entre enero-abril), los paneles centrales los promedios de primavera-verano (mayo-agosto) y en los paneles de la derecha los promedios de los meses de otoño (septiembre-diciembre). Los paneles superiores son las condiciones sin arrastre directo de viento, los paneles centrales con $C_v=0.01$ y los paneles inferiores con $C_v=0.03$.

Para todas las condiciones de arrastre por viento se pueden observar que en el periodo primavera-verano las partículas tienden a dirigirse más hacia el norte y a desplazarse más rápido en comparación con el desplazamiento observado en invierno y otoño. La rapidez del desplazamiento se evidencia por la separación entre los centros de masa para diferentes tiempos (círculos azul, cian y verde).

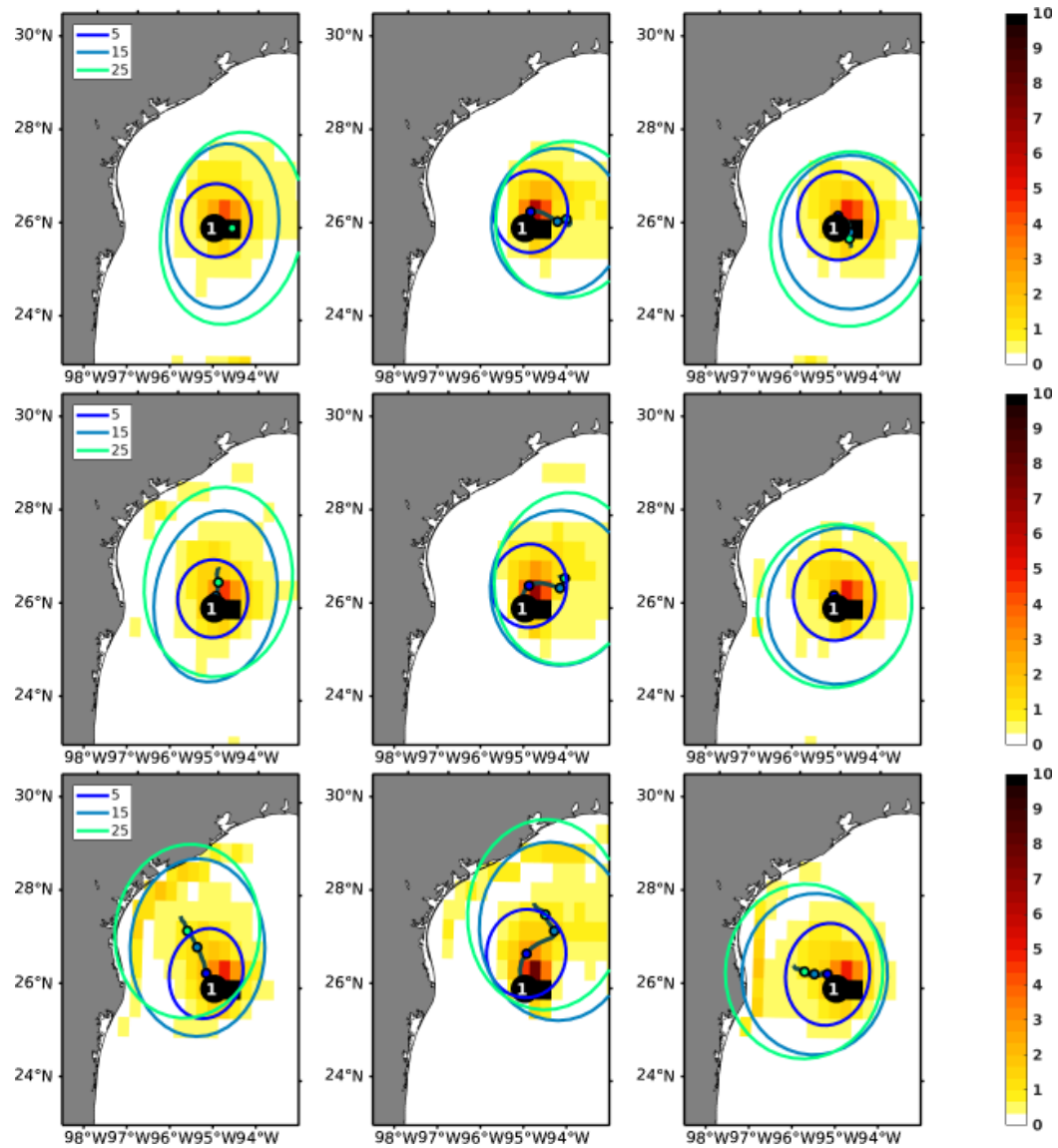


Figura 16. Promedio del Porcentaje Máximo de partículas para los periodos de invierno (paneles superiores), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles inferiores) para el punto de liberación P1 y para las tres condiciones de arrastre por viento analizadas: sin arrastre $C_v=0$ (paneles de la izquierda), $C_v=0.01$ (paneles centrales) y $C_v=0.03$ (paneles de la derecha). Se muestran la trayectoria promedio (línea negra) y las elipses de variabilidad de la posición para tres tiempos, $t=5$ (línea azul), 15 (línea cian), y 25 días (línea verde). Cada elipse se dibuja centrada en el centro de masa de las partículas a ese tiempo (círculos azul, cian y verde).

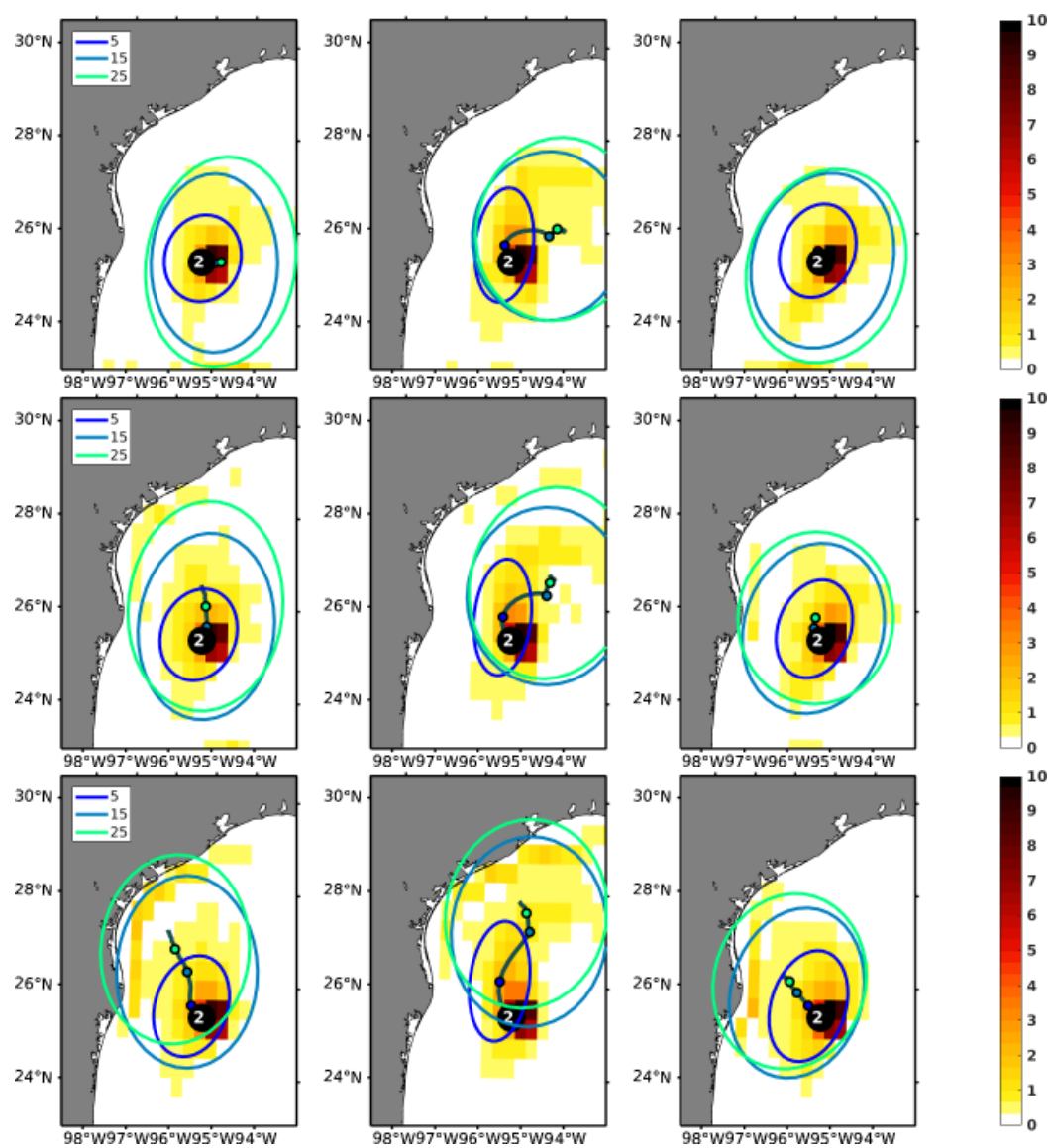


Figura 17. Igual que la Figura 16 pero para el punto de liberación P2.

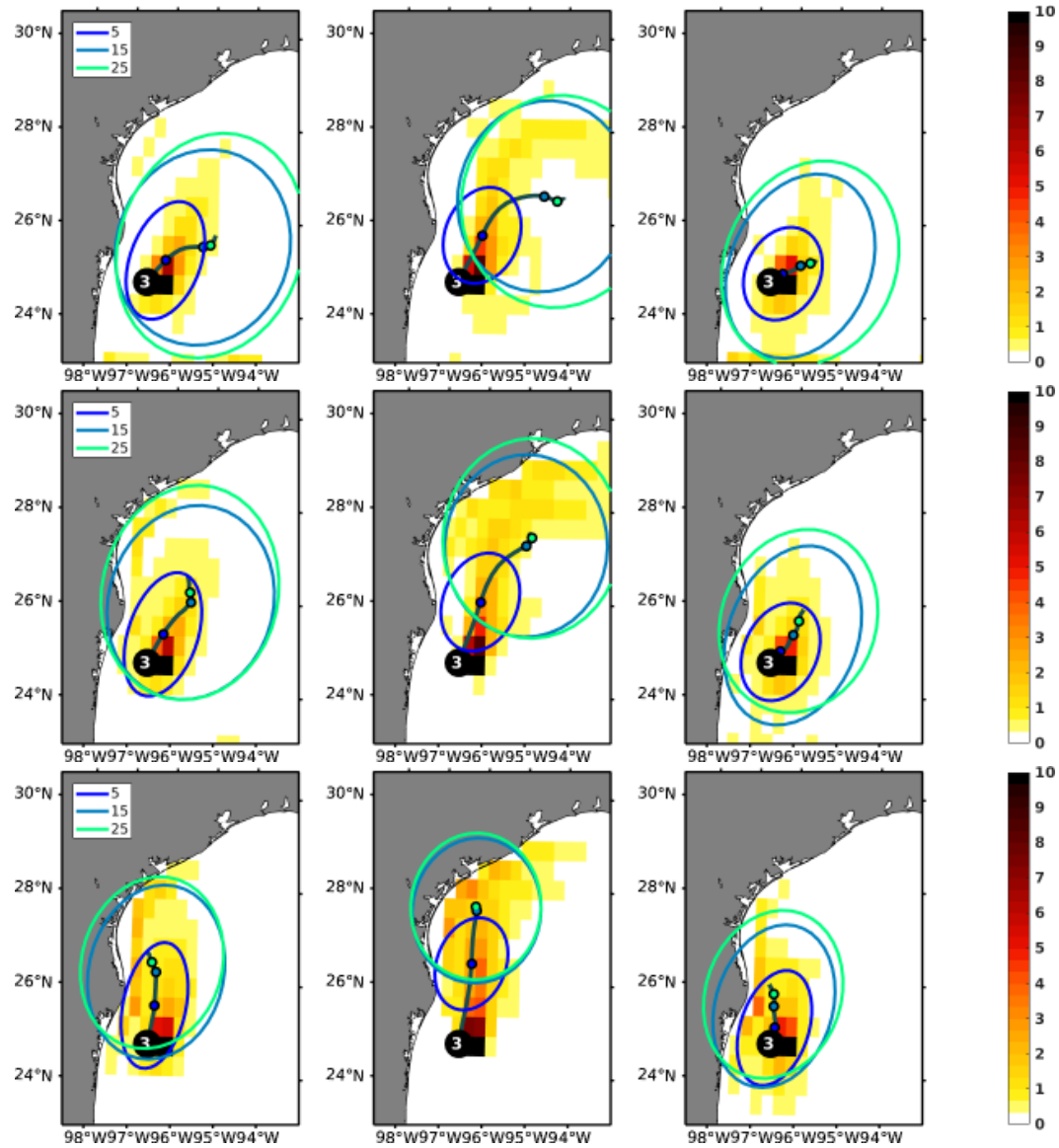


Figura 18. Igual que la Figura 16 pero para el punto de liberación P3.

De forma similar a la sección anterior, es de esperarse el cambio en la trayectoria promedio de las partículas cuando se considera el viento. Sin embargo, en este ejercicio se aprecia la compleja interacción entre el efecto de la estacionalidad del viento (Zavala-Hidalgo et al., 2003, Zavala-Hidalgo et al., 2014) y la estacionalidad de la corriente de frontera oeste (Oey, 1995; Sturges et al., 1993). Esta interacción define las trayectorias

CAPÍTULO IV



promedio de las partículas durante las estaciones, modifica el porcentaje de partículas que pueden arribar a las costas y por donde arriban.

IV.3.1.2. Arribo de partículas a la costa.

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo la zona costera se define como la región con profundidad menor e igual a 50 metros. La zona costera fue dividida en tres subzonas, la costa de Tamaulipas, la costa de Texas y la costa de Luisiana (Zonas A, B y C respectivamente, Figura 19). En el análisis se permitió el intercambio entre subzonas contiguas pero se limitó el movimiento de las partículas que llegaron a la isóbata de 20 m por lo que, en esta subsección, el porcentaje de arribo se refiere a las partículas que llegaron a los 20 m de profundidad y que se acumularon en una zona durante los 40 días de cada liberación. En la Figura 19 se muestran el porcentaje promedio de partículas que arriban a la zona costera provenientes de los puntos de liberación P1, P2 y P3, respectivamente. En esta figura los paneles de la izquierda son el promedio sin arrastre directo del viento, los paneles centrales son con $C_v=0.01$ y los de la derecha son con $C_v=0.03$.

El porcentaje de partículas que arriban a la zona costera provenientes de los puntos P1 y P2 son muy similares. En ausencia de arrastre directo del viento hay un porcentaje de arribo menor al 5%. Al incluir el arrastre por viento el porcentaje de arribo es superior al 10%. El máximo arribo ocurre con $C_v=0.03$ en la zona B con un porcentaje de alrededor del 25%. Esto muestra que el arrastre directo del viento sobre las partículas juega un papel muy importante para el arribo de partículas en la superficie.

El porcentaje de partículas liberadas desde el punto P3 que arriban a las zonas A, B y C es mayor en comparación con el arribo de partículas liberadas en P1 y P2. A pesar de la cercanía de la zona A al punto P3, cuando no se considera el arrastre por viento, el porcentaje

CAPÍTULO IV



de partículas que arriba a esta zona es menor que los porcentajes correspondientes a las zonas B y C. Al igual que en las liberaciones realizadas en los puntos P1 y P2, ocurre un mayor arribo de partículas a la costa cuando se considera el arrastre directo del viento; y este arribo es mayor en B que en A, y mayor en A que en C.

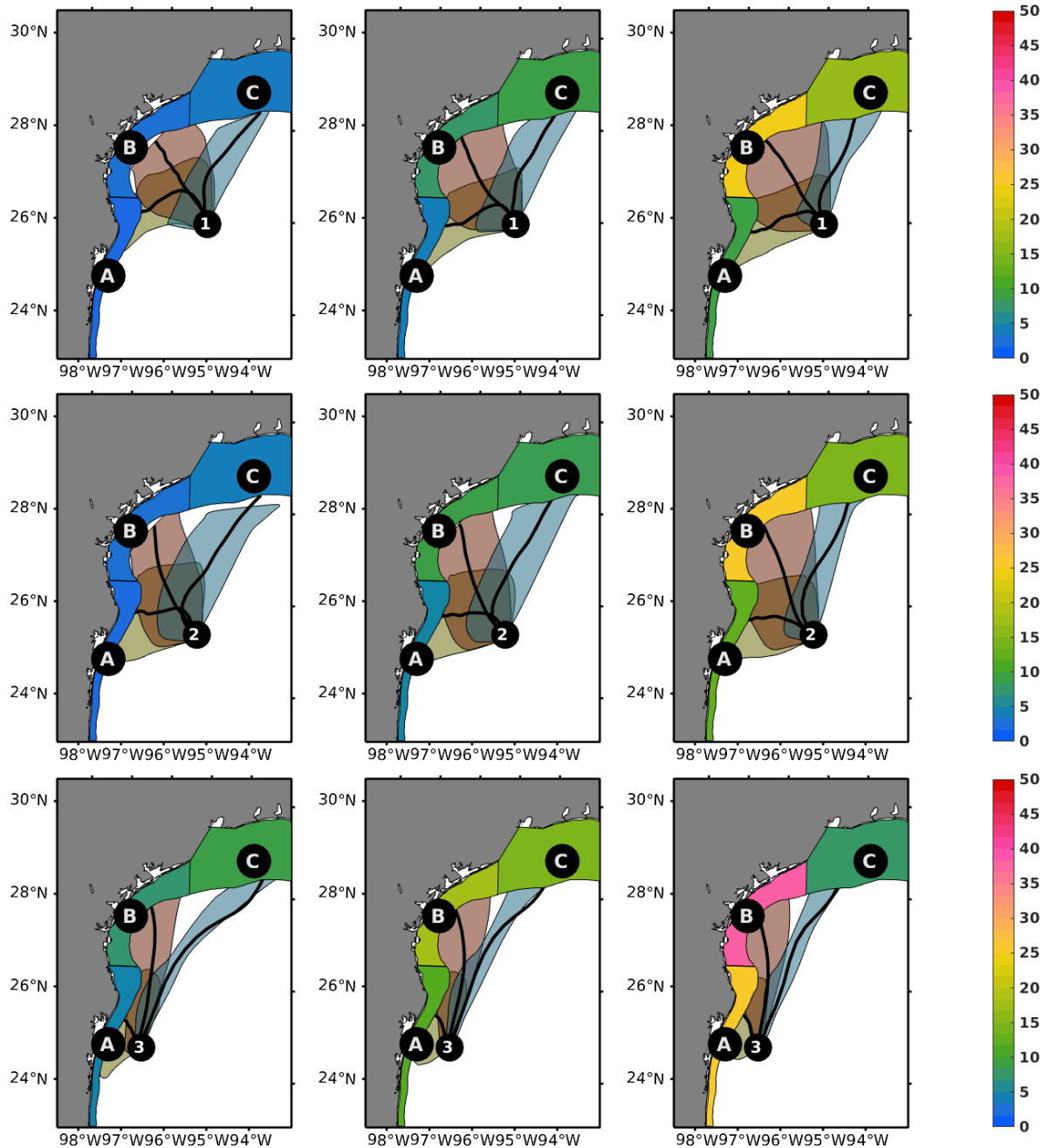


Figura 19. Porcentaje de arribo promedio a las zonas A, B y C de partículas liberadas en los puntos P1, P2 y P3, sin arrastre directo del viento $C_v=0$ (panel izquierdo), con $C_v=0.01$ (panel medio y con $C_v=0.003$ (Panel derecho). Las líneas negras son las trayectorias promedio a cada zona y las áreas en tonos de café y gris indican la desviación estándar de las trayectorias.

Para determinar las áreas que pudieran tener con mayor probabilidad de arribo se dividió la zona costera en áreas de aproximadamente 500 km de longitud. En la Figura 20 se muestran

CAPÍTULO IV



los porcentajes promedio de arribo a estas áreas provenientes de los puntos P1 (paneles superiores), P2 (paneles centrales) y P3 (paneles inferiores). Los números dentro de cada área corresponden al promedio del tiempo mínimo que una partícula puede llegar a dicha zona desde el punto de liberación.

En ausencia de arrastre directo del viento (paneles de la izquierda) el tiempo de arribo de los puntos P1 y P2 es mayor a 20 días y el porcentaje de arribo es menor al 2.5%. En comparación, el porcentaje de arribo del punto P3 es mayor y el tiempo de arribo disminuye, lo que implica que las partículas se aproximan rápidamente a la costa principalmente al área centrada en los 28°N , frente a Corpus Christy, TX. Algo similar se observa en los experimentos con $C_v=0.01$ y $C_v=0.03$, pero al aumentar C_v el porcentaje de arribo se incrementa y el tiempo de arribo disminuye. Lo que implica que el arrastre directo del viento aumenta la probabilidad de arribo y ocasiona que las partículas se aproximen más rápido a la costa.

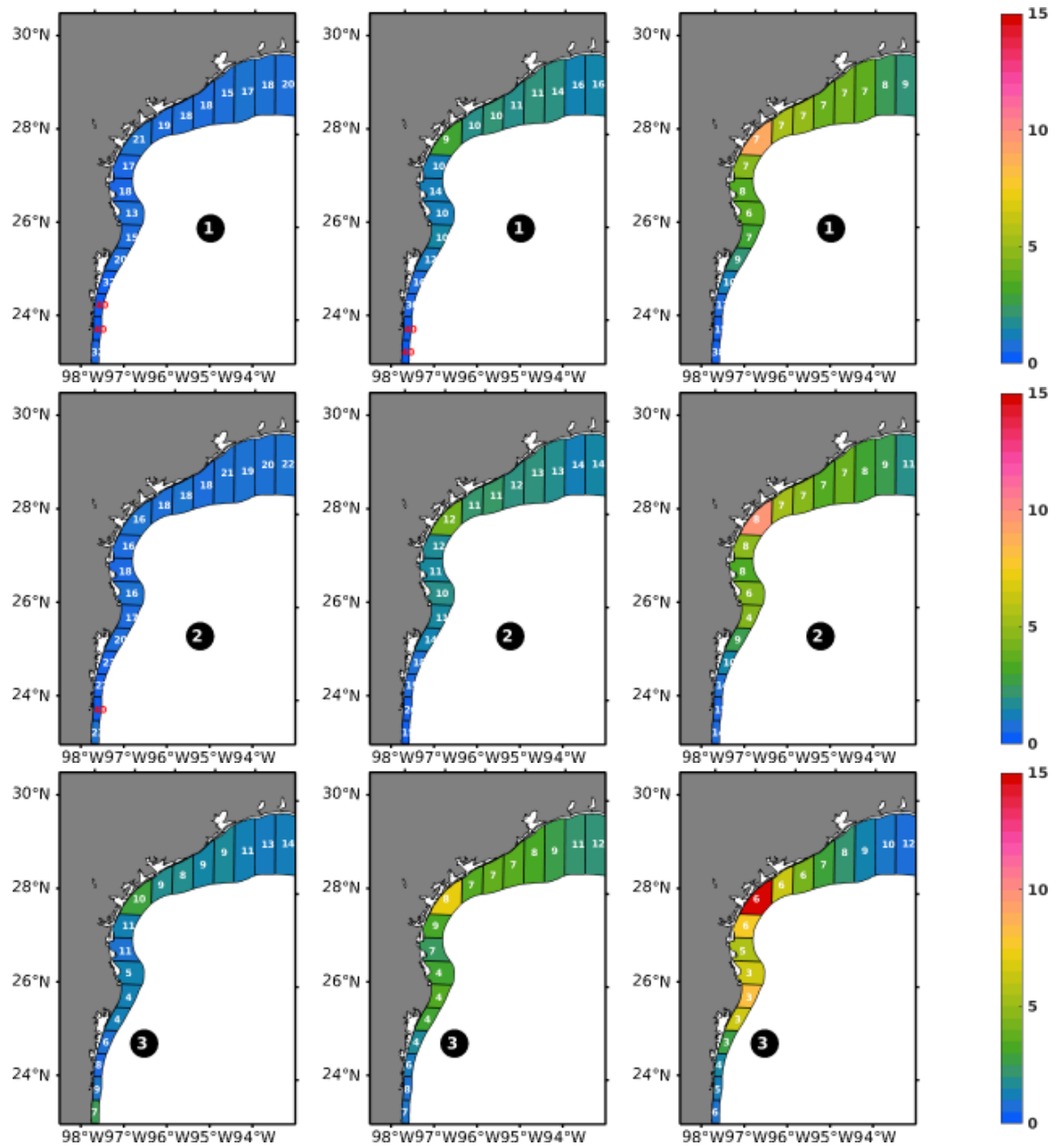


Figura 20. Porcentaje de partículas que arriban a la zona costera provenientes de los puntos de liberación P1 (paneles superiores), P2 (paneles centrales) y P3 (paneles inferiores) para las tres condiciones de arrastre por viento analizadas: sin arrastre $C_v=0$ (paneles de la izquierda), $C_v=0.01$ (paneles centrales) y $C_v=0.03$ (paneles de la derecha). Los colores indican el porcentaje de arribo y los números el tiempo promedio de arribo.



IV.3.1.2.1. Variabilidad temporal de la probabilidad de arribo de partículas a la costa.

En general cuando se considera el arrastre por viento, el porcentaje de partículas que arriban a las regiones A, B y C es mayor que cuando no hay viento (Figura 21, Figura 22 y Figura 23). Particularmente cuando las partículas son liberadas desde el punto de liberación P1 se puede observar que ocurre arribo a la zona A en los primeros meses del año, seguido de un periodo de abril a agosto en el que prácticamente no hay arribo de partículas y posteriormente un incremento en el porcentaje durante los meses de otoño, con un máximo en noviembre. Este mismo patrón bimodal ocurre en el porcentaje de arribo a la zona B, con máximos relativos en los meses de marzo-abril y agosto-septiembre. En cambio, la zona C presenta un comportamiento monomodal completamente diferente con un máximo en verano, alrededor de junio y con periodos de porcentaje de arribo bajo a principios y finales del año. Nótese, que los patrones descritos son muy similares en los experimentos con $C_v=0$, 0.01 y 0.03. El arrastre directo ocasiona un incremento del porcentaje de partículas que arriban a las tres zonas pero no modifica el patrón estacional observado.

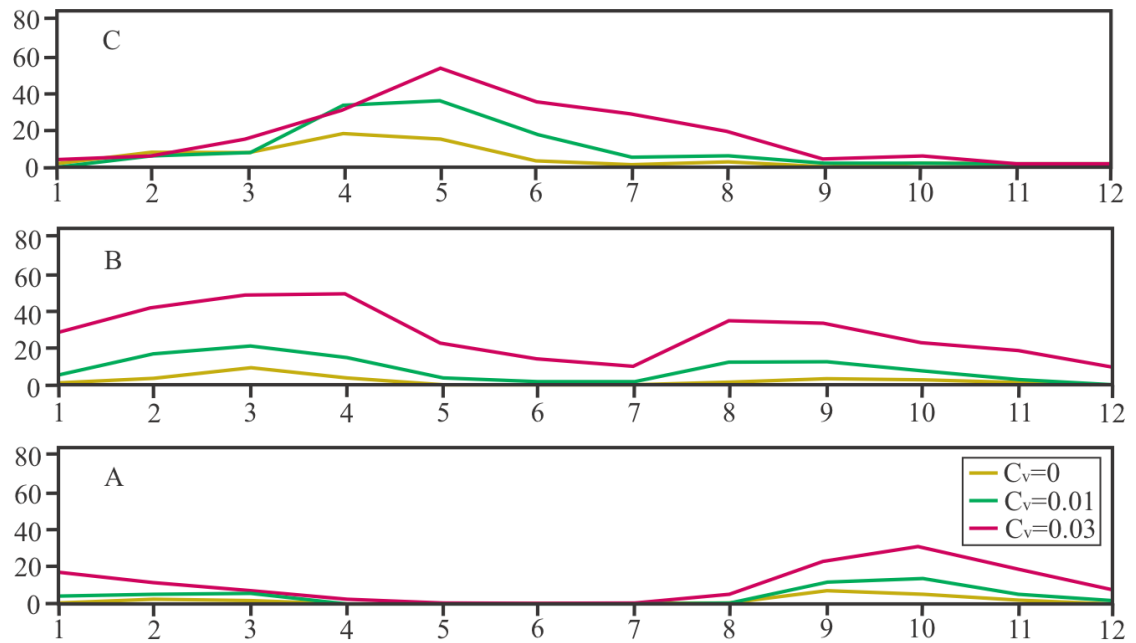


Figura 21. Climatología de arribo de partículas mensual a las zonas A (panel superior), B (panel medio), C(panel inferior) para los tres casos de arrastre por viento ($C_v=0$, color olivo; $C_v=0.01$, color verde y $C_v=0.03$ Color rojo), provenientes del punto de liberación P1.

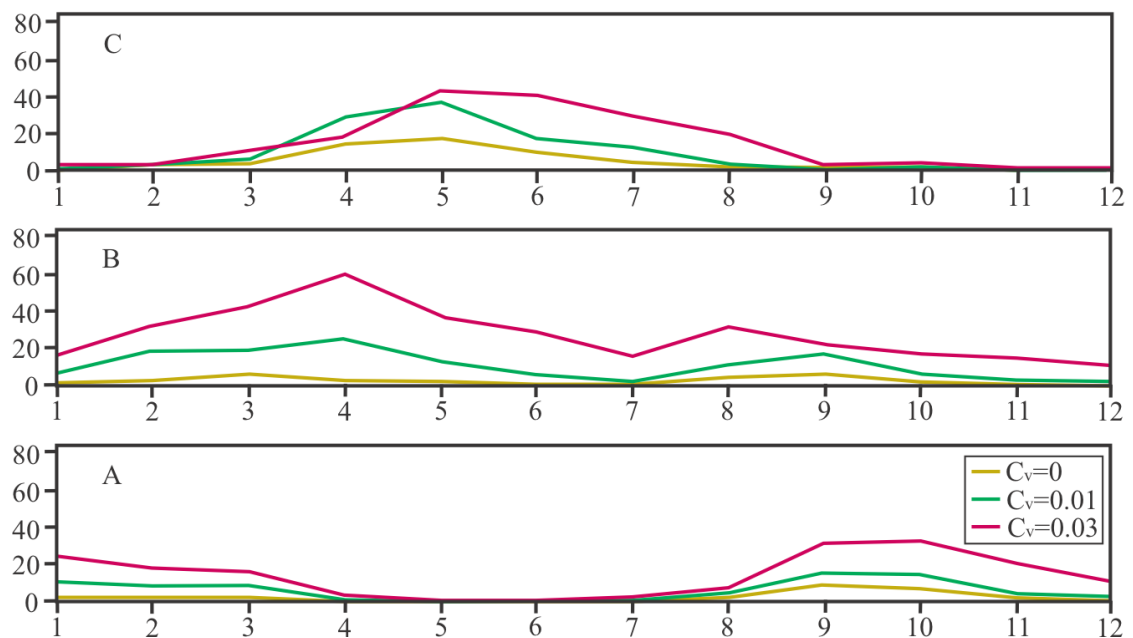


Figura 22. Climatología de arribo de partículas mensual a las zonas A (panel superior), B (panel medio), C(panel inferior) para los tres casos de arrastre por viento ($C_v=0$, color olivo; $C_v=0.01$, color verde y $C_v=0.03$ Color rojo), provenientes del punto de liberación P2.

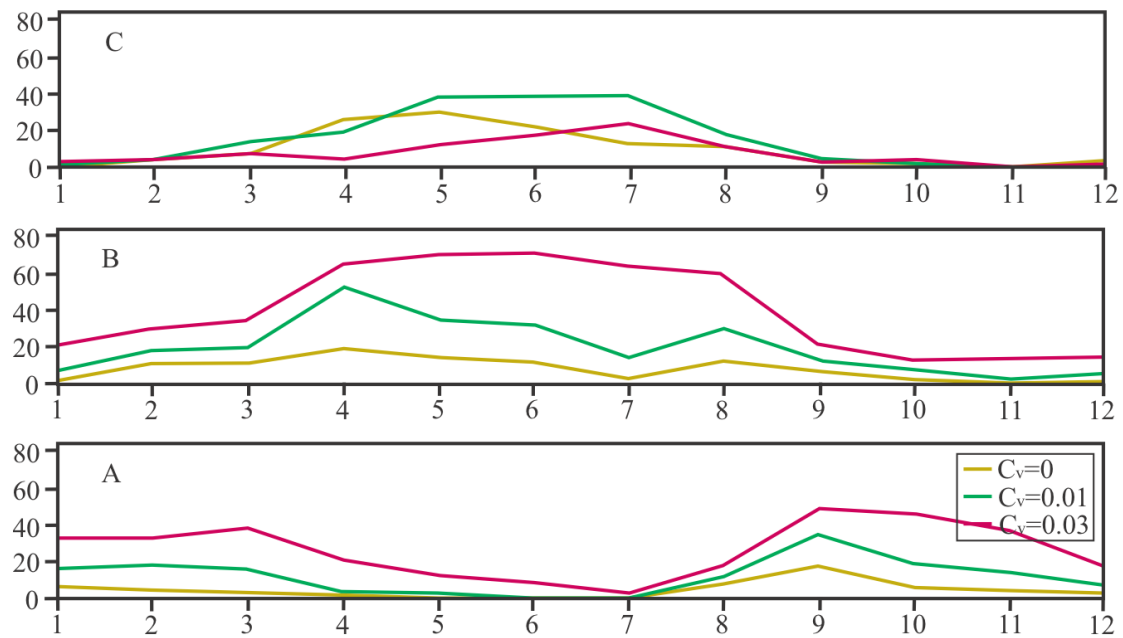


Figura 23. Climatología de arribo de partículas mensual a las zonas A (panel superior), B (panel medio), C(panel inferior) para los tres casos de arrastre por viento ($C_v=0$, color olivo; $C_v=0.01$, color verde y $C_v=0.03$ Color rojo), provenientes del punto de liberación 3.

El patrón estacional del arribo de partículas provenientes del punto de liberación P2 (Figura 22) es muy similar al descrito para el punto P1. El mayor porcentaje de arribo de partículas en las regiones A y B sucede a principio y fin de año, mientras que en la zona C sucede durante el verano.

Las partículas liberadas en el punto de liberación P3 tienen un patrón estacional diferente en el área B comparado con el de las partículas liberadas en los puntos P1, P2 y más similar al patrón estacional observado para el área C que el observado para el área A. Es de notar que el porcentaje de partículas liberadas en el punto P3 que arriban al área C disminuye al incluir el arrastre por viento (Panel superior de la Figura 23), esto podría indicar que los vientos de verano favorecen el arribo al área B y limitan el porcentaje de partículas que pueden arribar al área C.

CAPÍTULO IV



En las Figura 24-Figura 26 se muestra la estacionalidad del arribo a la zona costera provenientes de los puntos de liberación P1, P2 y P3, respectivamente. En las tres figuras en los paneles izquierda se presenta el promedio del arribo a las zonas A, B y C en los meses de invierno, en los paneles centrales en el periodo primavera-verano y en los paneles de la derecha para el otoño. Los 3 paneles superiores corresponden a la condición sin arrastre directo del viento, los paneles centrales a $C_v=0.01$ y los paneles inferiores a $C_v=0.03$.

Para las partículas liberadas en el punto P1 (Figura 24), en ausencia de arrastre directo del viento, $C_v=0$, en invierno ocurre principalmente el arribo a las áreas B y C con un 6% y 10%, respectivamente. Durante el verano prácticamente solo ocurre arribo al área C, mientras que en el otoño el mayor arribo ocurre en la zona A, con un 6%. Al incluir el arrastre directo del viento sobre las partículas, el arribo a las tres áreas presenta un patrón similar pero con un incremento en el porcentaje de arribo. Este incremento es más pronunciado en el área B.

La estacionalidad del arribo de partículas provenientes del punto P2 (Figura 25) presenta un patrón muy similar al descrito para las partículas liberadas en punto P1 (Figura 24). La estacionalidad del arribo de las partículas liberadas en el punto P3 (Figura 26) indica un mayor arribo de partículas en la zona A durante los periodos de otoño e invierno comparado contra las partículas liberadas desde los puntos P1 y P2 para las mismas temporadas. También indica un mayor arribo de partículas en la zona B durante el período de verano comparado contra las partículas liberadas desde los puntos P1 y P2 para la misma temporada.

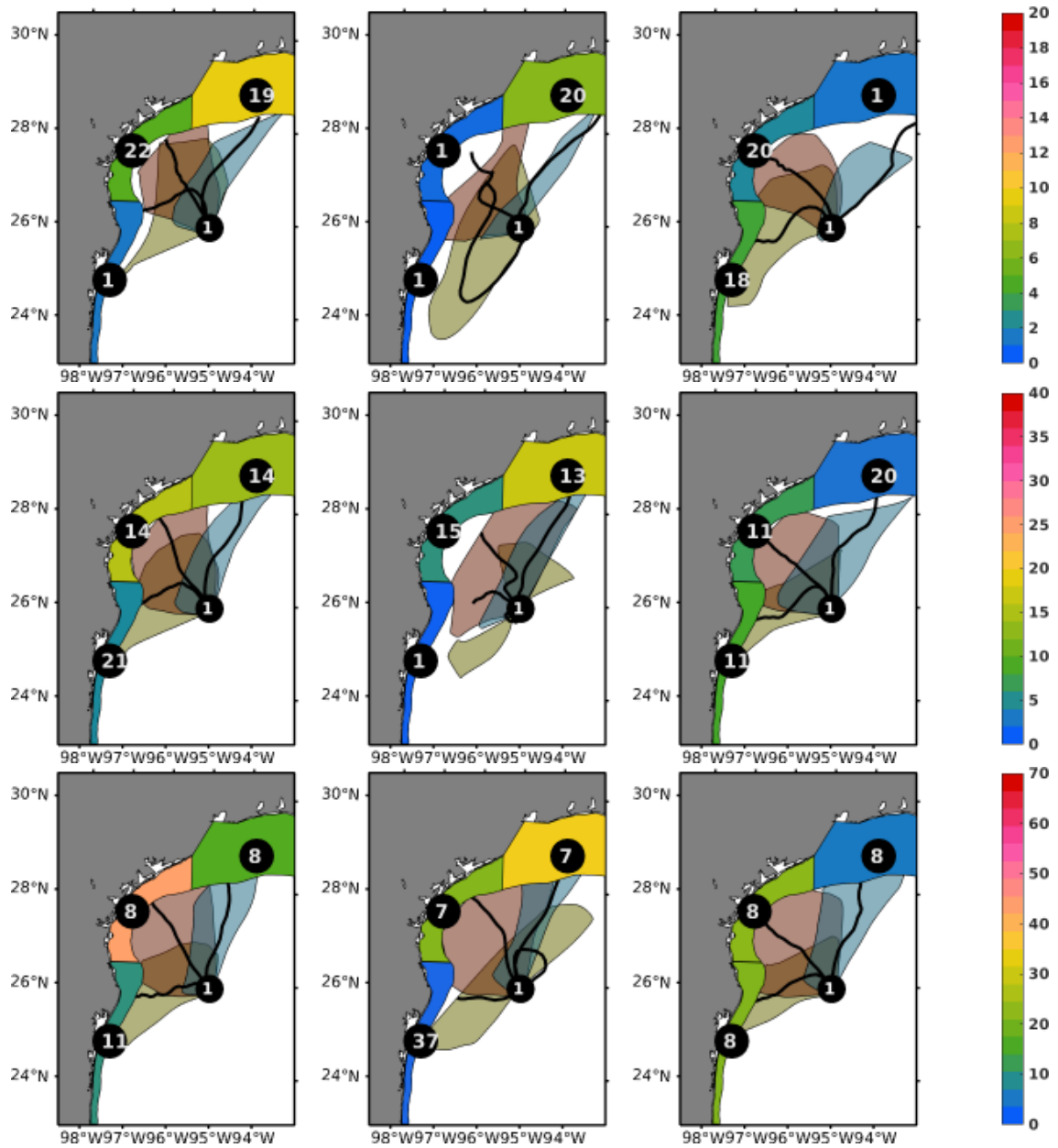


Figura 24. Promedio estacional del porcentaje de partículas liberadas en P1 que arriban a las zonas A, B y C en los meses de invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha para el otoño). Los 3 paneles superiores corresponden a la condición sin arrastre directo del viento, los paneles centrales a $C_v=0.01$ y los paneles inferiores a $C_v=0.03$.

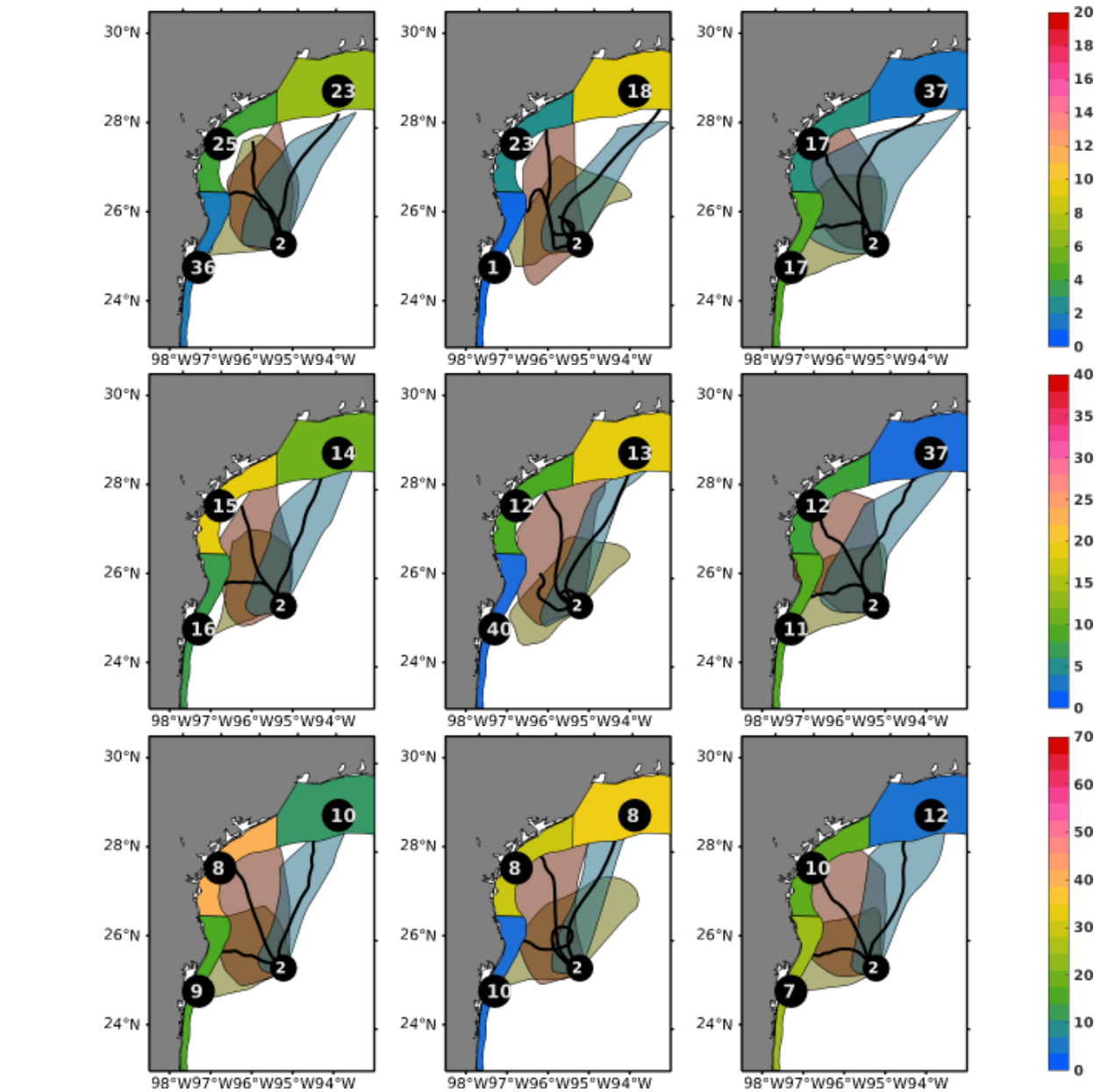


Figura 25. Promedio estacional del porcentaje de partículas liberadas en P2 que arriban a las zonas A, B y C en los meses de invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha para el otoño). Los 3 paneles superiores corresponden a la condición sin arrastre directo del viento, los paneles centrales a $C_v=0.01$ y los paneles inferiores a $C_v=0.03$.

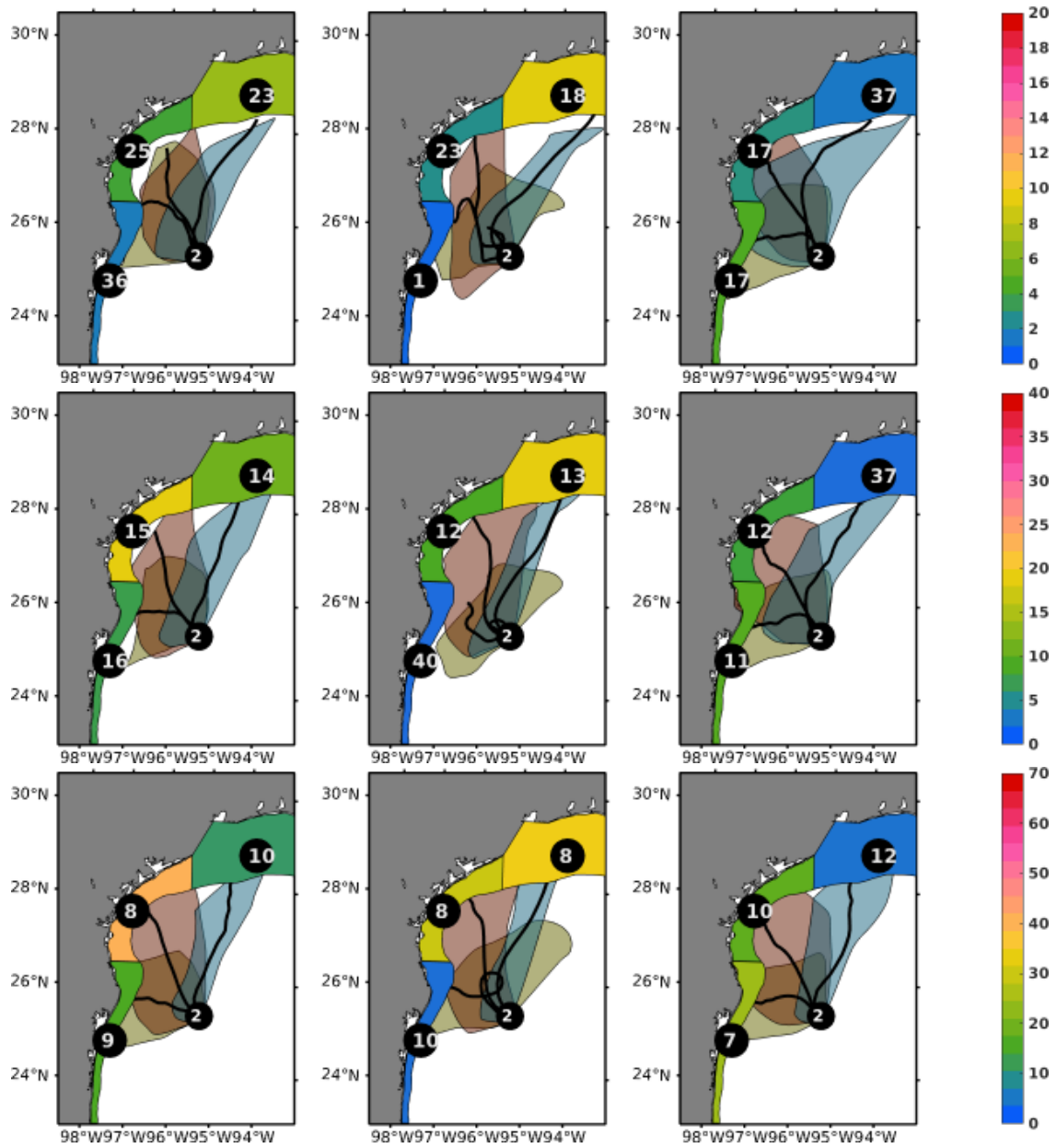


Figura 26. Promedio estacional del porcentaje de partículas liberadas en P3 que arriban a las zonas A, B y C en los meses de invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha para el otoño). Los 3 paneles superiores corresponden a la condición sin arrastre directo del viento, los paneles centrales a $C_v=0.01$ y los paneles inferiores a $C_v=0.03$.

CAPÍTULO IV



IV.3.2. Procesos dinámicos.

En la Figura 27 se muestra la energía cinética promedio y las líneas de corriente de la circulación promedio para los 10 años simulados. En dicha figura se puede observar una circulación anticiclónica dominante, con el máximo de energía cinética en la zona costera de Tamaulipas. Este máximo de energía comienza a desviarse hacia el este conforme aumenta la latitud. Algo similar sucede con las pLCSs calculadas para los 10 años de simulaciones. Los valores máximos de pLCSs indican donde se encuentran las barreras de transporte más persistentes durante todo el periodo simulado. En esta figura se observa que las pLCSs tienen valores mayores a 2 cerca de la costa y que éstos valores disminuyen a medida que se alejan de ella. Además se observan un conjunto de valores elevados que forman una estructura en forma de garfio o gancho. Esta estructura en forma de garfio fue descrito previamente por Gough et al. (2019). En su trabajo ellos mostraron que los trazadores y derivadores que se acercaban a dicha estructura desde la parte externa de la plataforma, eran atraídos por ella siguiendo a las pLCSs, para posteriormente ser esparcidas de forma anticiclónica hacia el océano profundo.

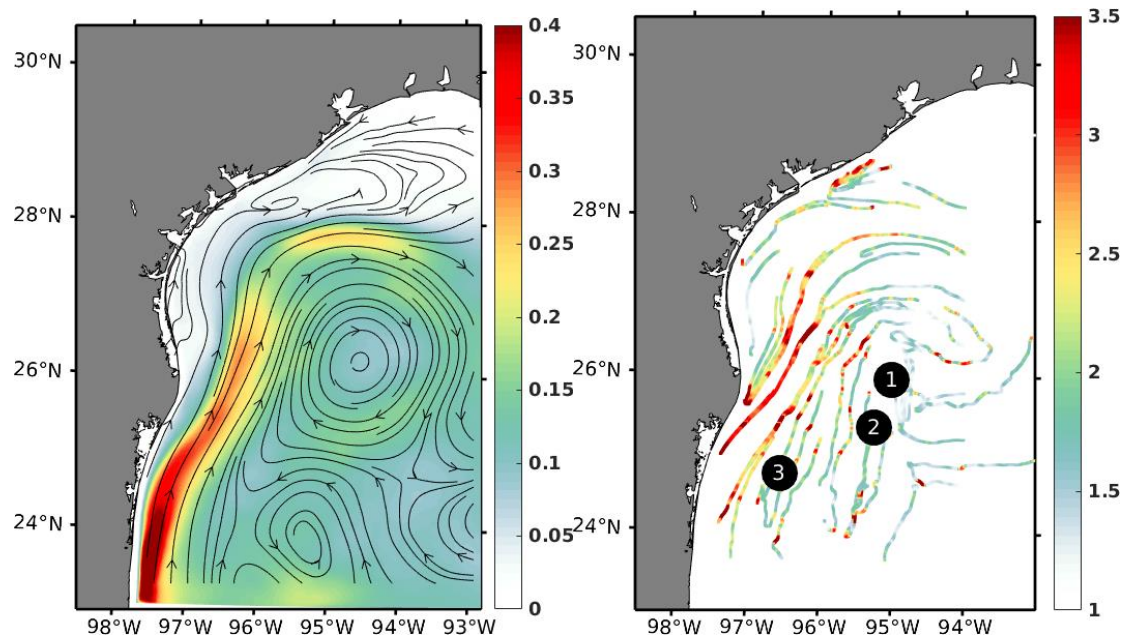


Figura 27. Energía cinética promedio (panel de la izquierda) y estructuras Lagrangianas coherentes persistentes, pLCS (panel de la derecha) calculadas para los 10 años de estudio. Las líneas negras son las líneas de corriente de la circulación promedio de los 10 años y los círculos negros representan los tres puntos de liberación de partículas.

En la Figura 28 se puede apreciar que estacionalmente el máximo de la energía cinética sucede durante el periodo de primavera-verano, mientras que en el otoño la energía cinética es mínima. En contraste, la energía cinética turbulenta tiene un máximo en invierno y un mínimo en primavera-verano. Durante primavera-verano la corriente de frontera se intensifica, actúa como una barrera de transporte; durante el invierno y el otoño, la corriente es menos intensa y permite el paso de partículas de la región profunda a la zona somera. Estos resultados son consistentes con los observados por Luo et al. (2016), quienes muestran que durante el verano las estructuras de los campos de vorticidad están poblados por menos remolinos de submesoescala y presentan corrientes intensas. Durante el invierno, sus simulaciones muestran un mayor número de estructuras de submesoescala y una disminución en la intensidad de las corrientes debido, en parte, a que en invierno la capa superficial del

CAPÍTULO IV



mar se enfría por lo que el agua en la superficie se hace más densa y tiende a hundirse (Luo et al., 2016). Estos hundimientos de agua permiten la formación de inestabilidades baroclínicas y hacen que la estratificación durante el invierno sea débil (Boccaletti et al., 2007). La presencia de estas inestabilidades permite la formación de estructuras de submesoescala y que aumente la profundidad de la capa de mezcla. Durante el verano el agua superficial es cálida con estratificación bien definida. Hay pocas o nulas inestabilidades baroclínicas durante esta temporada por lo que la ocurrencia de remolinos pequeños es baja. La ausencia de remolinos pequeños y la estratificación del océano bien definida favorecen la intensificación de las corrientes y de remolinos de mesoescala.

En la Figura 28 también se puede ver una estructura bien definida en las pLCSs, con valores continuos, durante primavera-verano mientras que durante el invierno y el otoño las pLCSs presentan valores menores y que varían mucho lo que indica que la persistencia de las LCSs es baja y por lo tanto la presencia de barreras al transporte hacia la costa es menor. Estos resultados son congruentes con los presentados por Gough et al. (2018) en su estudio de patrones Lagrangianos persistentes en el NOGoM.

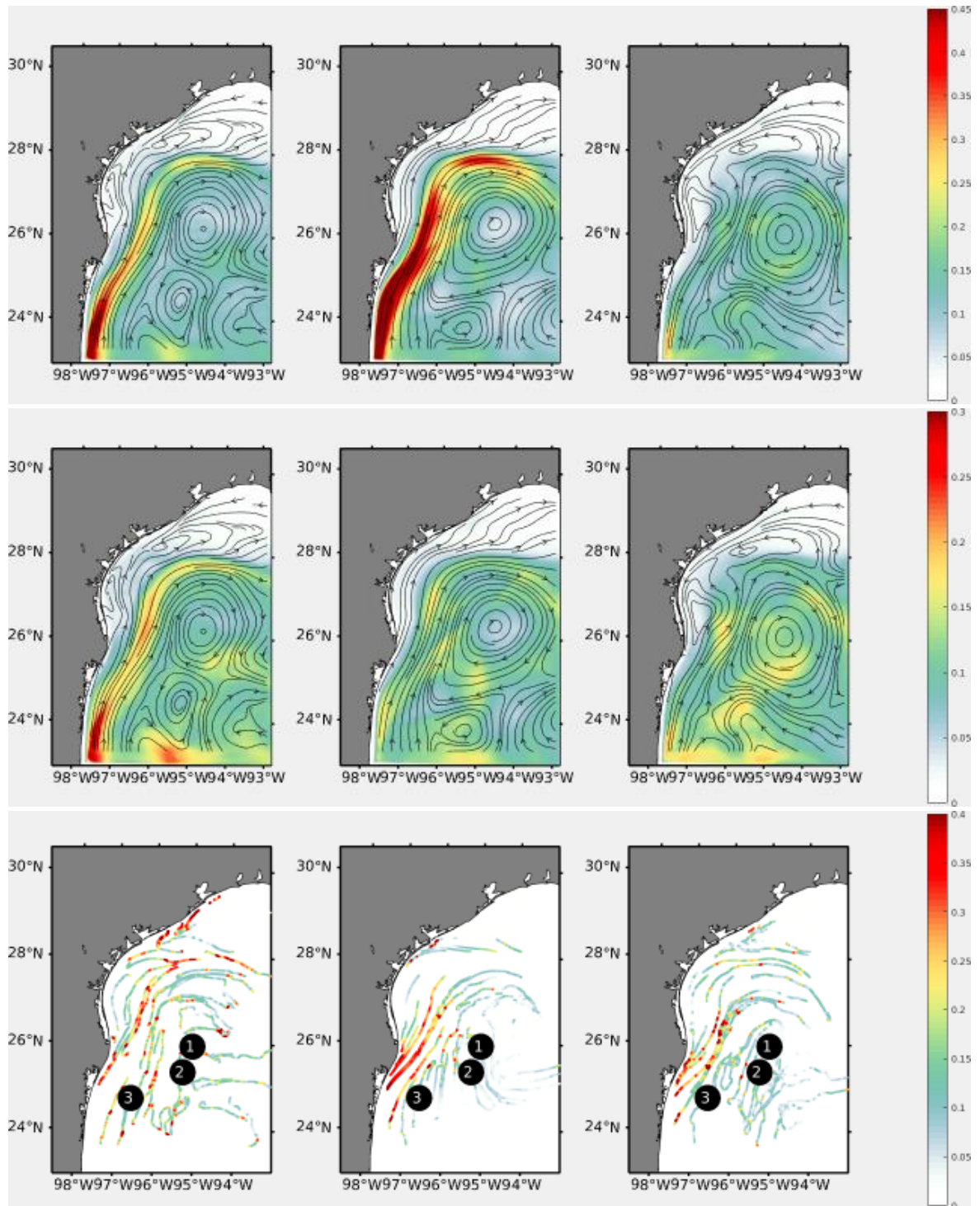


Figura 28. Promedio estacional de la energía cinética (paneles superiores), la energía cinética turbulenta (paneles de en medio) y estructuras Lagrangianas coherentes persistentes, pLCS (paneles inferiores) para el invierno (paneles de la izquierda), primavera-verano (paneles centrales) y otoño (paneles de la derecha). Las líneas negras son las líneas de corriente de la



circulación promedio de los 10 años y los círculos negros representan los tres puntos de liberación de partículas.

IV.4. Discusiones y conclusiones.

IV.4.1. Derrames de hidrocarburos y arribos a las costas del NOGoM.

Los cálculos de los TMA y de los PMax sirven para determinar las regiones con mayor riesgo de arribo de contaminantes y pueden ayudar a predecir el tiempo con que se cuenta para dar respuesta en caso de un derrame petrolero en la región. Las partículas liberadas desde los puntos de liberación P1 y P2 tuvieron un comportamiento parecido, y son los puntos de liberación más alejados de la costa. Los derrames en estos puntos pueden esparcirse hacia cualquier parte en el NOGoM. Los derrames probabilísticos realizados que consideran únicamente la corriente indican que es posible que un derrame en aguas profundas no alcance las costas o que tarde más de 20 días en llegar a estas. Sin embargo, al considerar el efecto del arrastre por viento la probabilidad de arribo de hidrocarburo a la costa es mucho mayor que cuando no se considera, indistintamente del sitio ocurra el derrame. Particularmente, un derrame en la zona cercana a la costa afectaría de forma casi inmediata a todas las actividades económicas que se realizan en la región. Además que limitaría los tiempos de respuesta por parte de las autoridades. En consecuencia es probable que un derrame cercano a la costa genere daños ambientales y económicos superiores a los que podrían ser generados por derrames que ocurran en la zona profunda.

El arrastre directo del viento puede incrementar hasta en 40% el arribo de partículas a las costas; y la estacionalidad influye en dicho arribo (Figura 21-Figura 23). Considerar el efecto del viento en los casos de derrames de hidrocarburos puede ayudar a predecir la trayectoria



de derrames que ocurran en un futuro, además de que puede ayudar a la toma de decisiones y a optimizar el uso de los recursos para enfrentar este tipo de situaciones.

Vale la pena mencionar que la advección utilizada en este trabajo no considera los procesos de degradación de los hidrocarburos como el intemperismo, evaporación, emulsión, disolución, oxidación (NRC, 2003), por lo que los resultados suponen el peor escenario en caso de que ocurra un derrame de petróleo en el NOGoM.

IV.4.2. Influencia de procesos dinámicos.

En general en el NOGoM la corriente de frontera es más intensa frente a Tamaulipas y disminuye su intensidad hacia el norte por lo que deja de actuar como una barrera de transporte, lo que favorece el paso de partículas de aguas profundas hacia aguas someras. Es por este motivo que el mayor porcentaje de arribo ocurre en la costa sur de Texas (zona B) entre los 26 y 29° N, con un máximo alrededor de los 28° N, frente a Corpus Christi, Texas. Además, en la plataforma interna de esta zona ocurre una inversión de la corriente. Durante el verano la corriente costera es anticiclónica y en invierno esta fluye hacia el sur (Ivanov et al., 2005; Zavala-Hidalgo, 2003) lo que puede favorecer el arribo de partículas provenientes de la zona somera de Texas hacia Luisiana o hacia Tamaulipas dependiendo de la temporada del año.

Particularmente en invierno, la corriente de frontera está menos definida y se da la presencia de estructuras de submesoescala que favorecen el intercambio de partículas entre la zona profunda y somera (Luo et al., 2016). Esto implica que durante un evento de derrame de petróleo en esta temporada el hidrocarburo llegará a las costas de Tamaulipas y Texas. El viento influencia el porcentaje de partículas que arriban a la costa. Cuando el arrastre por viento es de 3% ocurre el mayor arribo de partículas a dichas costas. En contraste, en

CAPÍTULO IV



primavera-verano la corriente de frontera se intensifica e impide que las partículas crucen en la parte sur del NOGoM reduciendo la probabilidad de arribo a la costa de Tamaulipas (zona A) y parcialmente al sur de Texas (zona B). Debido a que durante esta temporada la corriente está bien definida, las partículas son advectadas hacia el norte pudiendo cruzar hacia la zona costera en la región norte de Texas y Luisiana (zona C). En el otoño, la corriente de frontera es menos intensa y permite el intercambio de partículas entre la zona profunda y la somera, principalmente en la zona frente a Tamaulipas (zona A).



CAPÍTULO V: CONCLUSIONES GENERALES.

En el área del NOGoM, en el periodo de 1993 a 2016, se detectaron 254 remolinos geostroáficos, de los cuales 181 son remolinos ciclónicos y 73 son anticiclónicos. Se encontró que existe una región, centrada en 94.75° W y 26.75° N, donde ocurren el 30% del total de los remolinos ciclónicos detectados entre las isóbatas de 1000 y 2500 m. También se determinó, a partir de la relación entre el radio periférico A_f y el radio del núcleo A_c , que los remolinos de mesoescala del NOGoM retienen aproximadamente el 60% de su masa inicial, desde el momento de su detección hasta perder su coherencia. Los remolinos ciclónicos de la región en promedio retienen su masa por ~ 33 días mientras que los anticiclónicos la retienen por ~ 26 d. Rara vez los remolinos del NOGoM retienen su masa por más de 60 d.

La persistencia de partículas dentro del NOGoM es baja cuando un RCL se encuentra en la parte sureste del dominio de este estudio. Esto ocurre sin importar que el remolino sea coherente o no ya que, las corrientes que generan dichos remolinos favorecen la advección de partículas hacia afuera del NOGoM. La persistencia de partículas dentro del NOGoM es alta cuando los remolinos se encuentran totalmente dentro del área de estudio. En particular ocurre una alta persistencia cuando ocurren remolinos ciclónicos en la Región C

Al considerar el arrastre directo del viento el porcentaje de arribo de hidrocarburos a la costa aumenta hasta en un 40% y el tiempo de arribo se reduce de 20 a menos de 10 días. En general, cuando se considera el viento, la zona con mayor porcentaje de arribo es la costa de Texas indistintamente de donde sean liberadas las partículas. En promedio, los porcentajes de arribo de hidrocarburos a las costas de Texas, Luisiana y Tamaulipas son de $\sim 25\%$, $\sim 15\%$ y 10% , respectivamente; cuando dichos derrames son liberados desde P1 o desde P2 y se



considera el viento. Cuando las partículas son liberadas desde P3, el porcentaje de arribo a las costas de Texas, Tamaulipas y Luisiana es de ~40%, ~28% y ~8%, respectivamente. Cuando no se considera el efecto del viento los porcentajes de arribo a las costas son inferiores al 2% para las partículas liberadas desde P1 y P2; mientras que los arribos a las costas de las partículas liberadas desde P3, son de ~12% en Luisiana, 10% en Texas y menor al 5% en Tamaulipas. Esta diferencia entre los porcentajes de hidrocarburo que arriban a la costa cuando los derrames se simulan desde P1 o P2 contra los derrames simulados en P3, se debe principalmente al efecto de arrastre por viento y a que la corriente de frontera genera una barrera dinámica al transporte en el NOGoM. Particularmente, en Tamaulipas dicha barrera al flujo es más intensa y persistente, por lo tanto en general las partículas liberadas desde P3 no pueden cruzarla y son impulsadas hasta el norte por la corriente.

Los porcentajes de arribo a las costas tienen una clara estacionalidad. El arribo a la costa de Tamaulipas y Texas es más probable durante el otoño y el invierno, cuando la corriente de frontera está menos definida y se da la presencia de estructuras de submesoescala que favorecen el intercambio de partículas entre la zona profunda y somera. En cambio, el arribo a la costa de Luisiana es más probable en primavera-verano, debido a que en este periodo la corriente de frontera se intensifica y está bien definida, lo que impide que las partículas crucen hacia las costas de Tamaulipas y Texas y arriben a la costa de Luisiana.



REFERENCIAS.

- Abascal, A., Castanedo, S., Mendez, F., Medina, R., & Losada, I. (2009). Calibration of a Lagrangian transport model using drifting buoys deployed during the Prestige oil spill. *Journal of Coastal Research*, 25(1), 80–90. <https://doi.org/10.2112/07-0849.1>
- Abernathey, R., & Haller, G. (2018). Transport by Lagrangian vortices in the eastern Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 48(3), 667–685. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0102.1>
- Alpers, W., Holt, B., & Zeng, K. (2017). Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls. *Remote Sensing of Environment*, 201(August), 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.002>
- Andrade-Canto, F., Sheinbaum, J., & Zavala, L. (2013). A Lagrangian approach to the Loop Current eddy separation. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 20(1), 85–96. <https://doi.org/10.5194/npg-20-85-2013>
- Beron-Vera, F., Hadjighasem, A., Xia, Q., Olascoaga, M., & Haller, G. (2018). Coherent Lagrangian swirls among submesoscale motions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(37), 18251–18256. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701392115>
- Beron-Vera, F., Olascoaga, M., Haller, G., Farazmand, M., Triñanes, J., & Wang, Y. (2015). Dissipative inertial transport patterns near coherent Lagrangian eddies in the ocean. *Chaos*, 25(8). <https://doi.org/10.1063/1.4928693>
- Beron-Vera, Francisco, Wang, Y., Olascoaga, M., Goni, G., & Haller, G. (2013). Objective detection of oceanic eddies and the agulhas leakage. *Journal of Physical Oceanography*, 43(7), 1426–1438. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0171.1>
- Beyer, J., Trannum, H., Bakke, T., Hodson, P., & Collier, T. (2016). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 28–51. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
- Boccaletti, G., Ferrari, R., & Fox-Kemper, B. (2007). Mixed layer instabilities and restratification. *Journal of Physical Oceanography*, 37(9), 2228–2250. <https://doi.org/10.1175/JPO3101.1>
- 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), 16-1-16-4. <https://doi.org/10.1029/2002gl015587>
- Cetina-Heredia, P., Moninya, R., van Sebille, E., Keating, S., & Brassington, G. (2019). Retention and Leakage of Water by Mesoscale Eddies in the East Australian Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(4), 2485–2500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JC014482>
- Chelton, D., Gaube, P., Schlax, M., Early, J., & Samelson, R. (2011). The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. *Science*, 334(6054), 328–332. <https://doi.org/10.1126/science.1208897>



- Churchill, J., & Csanady, G. (1983). Near-Surface measurements of Quasi-Lagrangian Velocities in open water. *Journal of Physical Oceanography*.
- Condie, S., & Condie, R. (2016). Retention of plankton within ocean eddies. *Global Ecology and Biogeography*, 25(10), 1264–1277. <https://doi.org/10.1111/geb.12485>
- Coulliette, C., Lekien, F., Paduan, J., Haller, G., & Marsden, J. (2007). Optimal pollution mitigation in monterey bay based on coastal radar data and nonlinear dynamics. *Environmental Science and Technology*, 41(18), 6562–6572. <https://doi.org/10.1021/es0630691>
- El-Sayed, W., & Awad, A. (2012). Forecasting the oil spill impacts on coastal desalination plants in United Arab Emirates. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 164(March), 263–274. <https://doi.org/10.2495/WP120231>
- Elliott, B. (1982). Anticyclonic Rings in the Gulf of Mexico. In *Journal of Physical Oceanography* (Vol. 12, Issue 11, pp. 1292–1309). [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<1292:aritgo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<1292:aritgo>2.0.co;2)
- Garcia, A. (2020). *Simulación y análisis de derrames de petróleo tipo Ixtoc-I utilizando diferentes formas de advección*. Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Gough, M., Beron-Vera, F., Olascoaga, M., Sheinbaum, J., Jouanno, J., & Duran, R. (2019). Persistent Lagrangian transport patterns in the northwestern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 49(2), 353–367. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0207.1>
- Guerrero, L., Sheinbaum, J., Mariño-Tapia, I., González-Rejón, J., & Pérez-Brunius, P. (2020). Influence of mesoscale eddies on cross-shelf exchange in the western Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, 209(April). <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104243>
- Haller, G., & Beron-Vera, F. (2012). Geodesic theory of transport barriers in two-dimensional flows. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 241(20), 1680–1702. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2012.06.012>
- Haller, G., Hadjighasem, A., Farazmand, M., & Huhn, F. (2016). Defining coherent vortices objectively from the vorticity. *Journal of Fluid Mechanics*, 795, 136–173. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.151>
- Hamilton, P. (2007). Eddy statistics from Lagrangian drifters and hydrography for the northern Gulf of Mexico slope. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(9), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2006JC003988>
- Hamilton, P., Fargion, G., & Biggs, D. (1999). Loop current eddy paths in the western Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 29(6), 1180–1207. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<1180:LCEPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<1180:LCEPIT>2.0.CO;2)
- Ivanov, L., Chu, P., & Melnichenko, O. (2005). Fall – Winter Current Reversals on the Texas – Louisiana Continental Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 35, 902–910.
- Jernelöv, A., & Lindén, O. (1981). A Case Study of the World's Largest Oil Spill. *Ambio*, 10(6), 299–306.



- Kim, T., Yang, C., Oh, J., & Ouchi, K. (2014). Analysis of the contribution of wind drift factor to oil slick movement under strong tidal condition: Hebei Spirit oil spill case. *PLoS ONE*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087393>
- Korotenko, K. (2018). Effects of mesoscale eddies on behavior of an oil spill resulting from an accidental deepwater blowout in the Black Sea: An assessment of the environmental impacts. *PeerJ*, 2018(8). <https://doi.org/10.7717/peerj.5448>
- Leben, R. (2005). Altimeter-derived loop current metrics. *Geophysical Monograph Series*, 161, 181–201. <https://doi.org/10.1029/161GM15>
- Lipphardt, B., Poje, A., Kirwan, J. D., Kantha, L., & Zweng, M. (2008). Death of three loop current rings. *Journal of Marine Research*, 66(1), 25–60. <https://doi.org/10.1357/002224008784815748>
- Lobel, P., & Robinson, A. (1988). Larval fishes and zooplankton in a cyclonic eddy in Hawaiian waters. *Journal of Plankton Research*, 10(6), 1209–1223. <https://doi.org/10.1093/plankt/10.6.1209>
- Loya, Y., & Rinkevich, B. (1980). Effects of Oil Pollution on Coral Reef Communities. *Marine Ecology Progress Series*, 3(3), 167–180. <https://doi.org/10.3354/meps003167>
- Luo, H., Bracco, A., Cardona, Y., & McWilliams, J. (2016). Submesoscale circulation in the northern Gulf of Mexico: Surface processes and the impact of the freshwater river input. *Ocean Modelling*, 101(July 2010), 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.03.003>
- Makafui, A. (2018). Tracking pollutants using Lagrangian Coherent Structures. In *University of Ghana*. <https://doi.org/10.1080/02724936.1987.11748497>
- Maslo, A., Azevedo, J., Andrade-Canto, F., & Rodríguez Outerelo, J. (2020). Connectivity of deep waters in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 203, 103267. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103267>
- Meunier, T., Pallás-Sanz, E., Tenreiro, M., Portela, E., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., & Cusi, S. (2018). The Vertical Structure of a Loop Current Eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9), 6070–6090. <https://doi.org/10.1029/2018JC013801>
- Monreal-Gómez, M., Salas-de-León, D., & Gracia Gasca, A. (2004). Golfo de México circulación y productividad. *Ciencias*, 76, 24–33.
- Nowlin, W., Jochens, A., Reid, R., & DiMarco, S. (1998). Texas-Louisiana Shelf Circulation and Transport Processes Study : Synthesis Report Volume II : Appendices. *U.S. Dept . of the Interior*, 2, 282.
- NRC. (2003). Oil in the sea III: inputs, fates, and effects. In *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. <http://www.nap.edu/catalog/10388.html>
- Oey, L. (1995). Eddy- and wind-forced shelf circulation. *Journal of Geophysical Research*, 100, 8621–8637.
- Oey, L., Ezer, T., & Lee, H. (2005). Loop Current, Rings and Related Circulation in the Gulf of Mexico: A Review of Numerical Models and Future Challenges. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*, 161, 31–56.



<https://doi.org/10.1029/161GM04>

- Ohlmann, J., Niiler, P., Fox, C., & Leben, R. (2001). Eddy energy and shelf interactions in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C2), 2605–2620. <https://doi.org/10.1029/1999jc000162>
- Perrie, W., Tang, C., Hu, Y., & DeTracy, B. (2003). The impact of waves on surface currents. *Journal of Physical Oceanography*, 33(10), 2126–2140. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<2126:TOWOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<2126:TOWOS>2.0.CO;2)
- Portela, E., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Meunier, T., Ruiz-Angulo, A., Sosa-Gutiérrez, R., & Cusí, S. (2018). Hydrography of the Central and Western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8), 5134–5149. <https://doi.org/10.1029/2018JC013813>
- Qiao, F., Wang, G., Yin, L., Zeng, K., Zhang, Y., Zhang, M., Xiao, B., Jiang, S., Chen, H., & Chen, G. (2019). Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill. *Science of the Total Environment*, 685, 856–866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.255>
- Sánchez-Velasco, L., Lavín, M., Jiménez-Rosenberg, S., Godínez, V., Santamaría-del-Angel, E., & Hernández-Becerril, D. (2013). Three-dimensional distribution of fish larvae in a cyclonic eddy in the Gulf of California during the summer. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 75, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.01.009>
- SE. (2016). *Información económica y estatal, Tamaulipas*.
- Secretaria de energía. (2019). *Plan Quinquenal de Licitaciones para la Exploración y Extracción de Hidrocarburos 2015-2019*.
- Silva, M., Etnoyer, P., & MacDonald, I. (2016). Coral injuries observed at Mesophotic Reefs after the Deepwater Horizon oil discharge. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 129, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.05.013>
- Solberg, A. (2012). Remote sensing of ocean oil-spill pollution. *Proceedings of the IEEE*, 100(10), 2931–2945. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2196250>
- Spaulding, M. (2017). State of the art review and future directions in oil spill modeling. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1–2), 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.001>
- Sturges, W., Evans, J., Wlesh, S., & Holland, W. (1993). Separation of Warm-Core Rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 23.
- Sumaila, U., Cisneros-Montemayor, A., Dyck, A., Huang, L., Cheung, W., Jacquet, J., Kleisner, K., Lam, V., Mccrea-Strub, A., Swartz, W., Watson, R., Zeller, D., & Pauly, D. (2012). Impact of the deepwater horizon well blowout on the economics of US gulf fisheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69(3), 499–510. <https://doi.org/10.1139/F2011-171>
- Sutyrin, G., Rowe, G., Rothstein, L., & Ginis, I. (2003). Baroclinic eddy interactions with continental slopes and shelves. *Journal of Physical Oceanography*, 33(1), 283–291.



[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0283:BEIWCS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0283:BEIWCS>2.0.CO;2)

- Toz, A., & Koseoglu, B. (2018). Trajectory prediction of oil spill with Pisces 2 around Bay of Izmir , Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 126(August 2017), 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.062>
- Vidal, V., Vidal, F., Hernández, A., Meza, E., & Zambrano, L. (1994). Winter water mass distributions in the western Gulf of Mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *Journal of Oceanography*, 50(5), 559–588. <https://doi.org/10.1007/BF02235424>
- Wang, Y., Beron-Vera, F., & Olascoaga, M. (2016). The life cycle of a coherent Lagrangian Agulhas ring. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(6), 3944–3954. <https://doi.org/10.1002/2015JC011620>
- Wang, Y., Olascoaga, M., & Beron-Vera, F. (2015). Coherent water transport across the South Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 42(10), 4072–4079. <https://doi.org/10.1002/2015GL064089>
- Wu, J. (1983). Sea-surface drift currents induced by wind and waves. *Journal of Physical Oceanography*, 13.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S., & O'Brien, J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(12), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2003jc001879>
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Morey, S., & Martínez-López, B. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmosfera*, 27(3), 317–334. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71119-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71119-1)