



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ANÁLISIS DE LA CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN EL
GOLFO DE MÉXICO A PARTIR DE OBSERVACIONES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A :

JENNY AMAIRANI VÁZQUEZ RAMÍREZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. LUIS EFRAÍN MORELES VÁZQUEZ

Ciudad Universitaria, CDMX, 2022

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos de la alumna
Vázquez
Ramírez
Jenny Amairani
55 6470 9935
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
314122335
2. Datos del tutor
Dr.
Luis Efraín
Moreles
Vázquez
3. Datos del sinodal 1
Dr.
Jorge
Zavala
Hidalgo
4. Datos del sinodal 2
Dr.
Luis
Zavala
Sansón
5. Datos del sinodal 3
Dra.
Erika Danaé
López
Espinoza
6. Datos del sinodal 4
Dra.
Karina
Ramos
Musalem
7. Datos del trabajo escrito
Análisis de la circulación superficial en el Golfo de México a partir de observaciones
125 p
2022

«Mire el océano, señor profesor. ¿No está dotado de una vida real? ¿No tiene sus ataques de cólera y sus accesos de ternura? Ayer se durmió como nosotros y helo aquí que se despierta tras una noche apacible.

[...] ¡Mire cómo se despierta bajo las caricias del sol para revivir su existencia diurna! Interesante estudio el de observar el ritmo de su organismo. Posee pulso, arterias, tiene espasmos, y yo estoy de acuerdo con el sabio Maury, que ha descubierto una circulación tan real como la de la sangre en los animales.»

Julio Verne, 1869

Dedicatoria

A Jeremy, Charly, Mitch, Mine y Dana

Aunque no lo sepan, todo lo que hago,
lo hago por ustedes.

Agradecimientos

A mi familia por ser mi soporte, motivarme en mi proceso de formación y alentarme a seguir mi camino.

A Ricardo, por ser mi amigo, mi confidente y mi luz de esperanza. Anhele que sigamos viéndonos triunfar.

A mis compañeros tesisistas, Sebastián, Leticia, Oscar y Susana, quienes me acompañaron a lo largo de este proceso. Les deseo mucho éxito en sus siguientes aventuras.

También a mi tutor, Dr. Efraín Moreles, por toda la motivación, apoyo y conocimientos que me proporcionó. En todo este camino me guio de una manera excepcional y por lo cual le estoy sinceramente agradecida; escucharme, darme consejos, tenerme paciencia y valorar mi esfuerzo ha sido una fuente de inspiración que hizo que disfrutara este recorrido. Todos los alumnos en proceso de titulación, y aún más en el ámbito científico, merecen un tutor como usted, no menos.

A mis sinodales, Dr. Jorge Zavala, Dr. Luis Zavala, Dra. Erika López y Dra. Karina Ramos, quiénes desde un principio fueron afables y dedicaron tiempo en la revisión de la presente tesis. Los comentarios que me hicieron no solo me ayudaron a mejorar considerablemente mi trabajo, sino que también me abrieron un panorama más amplio en diversos temas. También al Dr. Erick Olvera quien, a pesar de no haber sido miembro del jurado, fue partícipe del trabajo que he realizado.

Al grupo de Interacción Océano Atmósfera, IOA-ICAYCC, por todos los recursos y herramientas que fueron fundamentales para este proyecto de tesis.

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA104320.

Resumen

El Sistema de la Corriente del Lazo, el cual comprende la Corriente del Lazo y los remolinos que de ella se dependen, y las corrientes en las plataformas continentales son dos de las características más importantes de la circulación oceánica superficial del Golfo de México. Realizar un estudio de estas dos características para obtener información abierta y actualizada de la circulación superficial del Golfo y su variabilidad es el objetivo principal de esta tesis, lo cual puede utilizarse en estudios de diferente naturaleza y para la validación de simulaciones numéricas. Para ambos estudios se utilizaron observaciones provenientes de datos altimétricos obtenidos del producto CMEMS para un lapso de 27 años (01/01/1993 – 03/06/2020). En el primer estudio se realizó un monitoreo del Sistema de la Corriente del Lazo a partir de un código numérico propio, en el cual se obtuvieron sus métricas, un análisis estadístico de éstas, y un registro de los eventos de separación de los remolinos; los resultados mostraron que la metodología propuesta es robusta y consistente con investigaciones previas. El segundo estudio consistió en cuantificar la variabilidad de las corrientes en las plataformas continentales del Golfo de México a través de análisis espectrales, con los cuales se obtuvieron periodogramas, potencias totales, periodos significativos y coeficientes rotatorios; los resultados mostraron que la mayor variabilidad de las corrientes en las plataformas se encuentra en la componente paralela a las isóbatas, y que los periodos dominantes en los que las corrientes rotan son el periodo semianual y anual, con rotación predominantemente horaria.

Palabras Clave: Sistema de la Corriente del Lazo, corrientes en plataforma, altimetría, monitoreo, análisis espectral.

Abstract

The Loop Current System, involving the Loop Current and its shed eddies, and the current in the continental shelves are two of the most important features of the surface ocean circulation of the Gulf of Mexico. Carrying out a study of these two features to obtain open and updated information on the surface circulation of the Gulf and its variability is the main objective of this thesis, which can be used in studies of different nature and for the validation of numerical simulations. For both studies, observations from altimetric data obtained from the CMEMS product for a period of 27 years (01/01/1993 – 03/06/2020) were used. In the first study, the Loop Current System was monitored from its own numerical code, in which its metrics were obtained, a statistical analysis of these, and a record of the eddy separation events; the results showed that the proposed methodology is robust and consistent with previous research. The second study consisted of quantifying the variability of the shelf currents of the Gulf of Mexico through spectral analysis, with which periodograms, total powers, significant periods and rotary coefficients were obtained; the results showed that the greatest variability of the shelf currents is in the component alongshelf, and that the dominant periods in which the currents rotate are the semiannual and annual period, with predominantly hourly rotation.

Keywords: Loop Current System, shelf currents, altimetry, monitoring, spectral analysis.

Índice general

Resumen	V
Abstract	VI
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XIII
Acrónimos	XIV
1. Introducción	1
2. Métodos de observación del océano: Altimetría Satelital	6
2.1. Principio de la altimetría	8
2.2. Ventajas y desventajas	11
2.3. Base de datos de altimetría	14
3. Circulación oceánica superficial en el Golfo de México	16
3.1. Sistema de la Corriente del Lazo	16
3.1.1. Corriente del Lazo	17
3.1.2. Remolinos de la Corriente del Lazo	18
3.2. Circulación en las plataformas continentales	22
3.2.1. WFS	28
3.2.2. LATEX	29
3.2.3. TAVE	31
3.2.4. BC	33
3.3. Interacción SCL - plataformas continentales	35
4. Metodología	36
4.1. Análisis del Sistema de la Corriente del Lazo	37
4.1.1. Métricas de la Corriente del Lazo	40
4.1.2. Métricas de los Remolinos de la Corriente del Lazo	42
4.2. Análisis de la circulación en las plataformas	43
4.2.1. Selección y preprocesamiento de datos	43
4.2.2. Espectros de Fourier	47
4.2.2.1. Procesamiento de señales	49
4.2.3. Espectros rotatorios	50
5. Métricas del Sistema de la Corriente del Lazo	57

5.1. Métricas de la Corriente del Lazo	57
5.1.1. Comparación con las observaciones	63
5.2. Métricas de los Remolinos de la Corriente del Lazo	68
5.2.1. Comparación con las observaciones	76
6. Variabilidad de las corrientes en superficie	79
6.1. Análisis de Fourier	80
6.2. Análisis rotatorio.	85
7. Conclusiones	91
Referencias	93
Apéndices	102
A. Producto CMEMS.	102
B. Contornos de los Remolinos de la Corriente del Lazo	103
C. Espectros de las componentes de la velocidad	105
C.1. Espectros de Fourier	105
C.2. Espectros rotatorios	108

Índice de Figuras

2.1. Cronología de las misiones de altimetría de radar modernas. Recuperado de Taburet et al. (2019).	7
2.2. Variables utilizadas en la altimetría. SSH es la altura del nivel del mar, MSS la superficie media del mar, SLA la anomalía del nivel del mar, MDT la topografía dinámica media, y ADT la topografía dinámica absoluta. Recuperado de AVISO (2011).	10
2.3. Distribución de productos DUACS. Recuperado de https://duacs.cls.fr/history-and-context/	15
2.4. Número de altímetros utilizados para los productos CMEMS. Recuperado de https://duacs.cls.fr/faq/cmems-and-c3s-duacs-altimeter-sea-level-products/	15
3.1. Sistema de la Corriente del Lazo. <i>Loop Current</i> denota la Corriente del Lazo y <i>Loop Eddy</i> denota un Remolino de la Corriente del Lazo. Recuperado de Hosansky (2011).	18
3.2. La Corriente del Lazo y los remolinos producidos. Recuperado de Ellis y Dean (2012).	19
3.3. Gráfica del periodo de separación contra la latitud de retraimiento de la Corriente del Lazo inmediatamente después de la separación del remolino anterior. Se combinaron los eventos de separación 6-7, 8-9 y 12-13. Recuperado de Leben (2005).	21
3.4. Hodógrafa de la capa límite de la superficie oceánica para el Hemisferio Norte. El esfuerzo del viento se dirige hacia el este. La velocidad superficial de Ekman, $u_E(0)$, está a la derecha del viento a 45° , y continúa rotando y disminuyendo con la profundidad. Si los vectores de velocidad se proyectan en un plano horizontal, sus puntas forman la espiral de Ekman. A varias profundidades de Ekman, δ_E , la velocidad se fusiona con la velocidad geostrófica, u_g . Recuperado de Apel (1987).	24
3.5. Medias mensuales a largo plazo (1999-2006) de los vientos en el Golfo de México basadas en datos de Qscat / SeaWinds. La rapidez del viento se indica en escalas de colores y las flechas indican su dirección. Periodo de enero a junio. Recuperado de Zavala-Hidalgo et al. (2014).	25

3.6. (Continuación). Medias mensuales a largo plazo (1999-2006) de los vientos en el Golfo de México. Periodo de julio a diciembre. Recuperado de Zavala-Hidalgo et al. (2014).	26
3.7. Mapa del Golfo de México. Se muestran los estados costeros y las plataformas continentales. Se indican las isobatas de 25, 50, 100, 500, 1,000, 2,500, 3,000 y 3,500 m. Recuperado de Romero-Centeno et al. (2021).	27
3.8. Principales corrientes superficiales en el Golfo de México. Recuperado de Peters et al. (2021).	28
3.9. Plataforma <i>West Florida Shelf</i> . Se muestran las principales zonas de la plataforma, así como los ríos (líneas azules).	29
3.10. Plataforma Texas-Luisiana. Se muestran los ríos (líneas azules) y las principales zonas de descarga de éstos. La zona de confluencia (círculo rojo) fue estimada a partir del estudio de Zavala-Hidalgo et al. (2003).	31
3.11. Plataforma Tamaulipas-Veracruz. Se muestran los ríos de la plataforma (líneas azules) junto con las principales zonas de descarga de éstos.	33
3.12. Banco de Campeche. Se muestran los ríos de la plataforma (líneas azules), así como la zona de confluencia (cuadro rojo), la cual fue estimada a partir del estudio de Zavala-Hidalgo et al. (2003).	34
4.1. Ejemplo del día 08 de julio del 2013 de los valores de ADT (quitándole la media espacial) y las isolíneas (líneas negras) del módulo del gradiente de topografía [$\text{cm}/^\circ$]. El color blanco en la barra de colores indica el valor de 17 cm de ADT.	38
4.2. Ejemplo de contornos de ADT-17 cm encontrados en el día 28 de septiembre del 2019. El contorno gris corresponde a un Remolino de la Corriente del Lazo y los contornos verde y morado representan la Corriente del Lazo.	39
4.3. Ejemplo del contorno de la Corriente del Lazo en el día 15 de junio del 2019. Se muestra el valor de la métrica de máxima penetración al norte (punto azul) y al oeste (punto rojizo) de la corriente. La métrica de extensión y circulación se calcula con el contorno de la corriente (línea negra) en tanto la métrica del área se calcula con el polígono especificado por el contorno de la corriente y las rectas (líneas naranjas) que unen los puntos p_1 , p_2 y p_3 (puntos rojos).	41
4.4. Puntos escogidos para realizar el análisis espectral. Se seleccionaron 8 puntos a lo largo de la isóbata de los 50 m (círculos amarillos) y 10 a lo largo de la isóbata de los 200 m (círculos verdes).	44
4.5. Ejemplificación del procedimiento de la descomposición de vectores, día 03 de junio del 2020. Si se quiere descomponer el vector velocidad (flechas azules) del punto elegido (rombo amarillo) en componentes paralela y perpendicular a la isóbata en cuestión (línea discontinua negra) se necesita trazar un vector representativo de la isóbata (flecha roja), el cual se constituye con un punto anterior y un punto posterior (puntos azules) al que se escogió. Esto se realiza para cada punto seleccionado.	45

4.6.	Diagrama que representa las componentes de velocidad paralela y perpendicular al vector representativo de la isóbata \vec{I} . La rotación considera un ángulo positivo θ (en sentido antihorario) desde el sistema cartesiano (x, y) , en el cual se define el vector velocidad (u, v) . Nótese que la componente perpendicular de la velocidad está dirigida hacia mar adentro.	45
4.7.	Una onda en el dominio del tiempo compuesta de la suma de tres ondas de amplitudes A_1, A_2, A_3 y frecuencias f_1, f_2 y f_3 , respectivamente. Cada componente se puede observar en el Dominio de la Frecuencia, lo que se le conoce como espectro. Recuperado de Langton y Levin (2016).	48
4.8.	Velocidad horizontal representada como un vector complejo, $w = u + iv$, con componentes u y v a lo largo de los ejes real e imaginario, respectivamente. Adaptado de Thomson y Emery (2014).	51
4.9.	Elipses de corriente formadas por la suma de vectores de rotación opuesta. (a) componente en sentido horario (w^-) y (b) componente en sentido antihorario (w^+) con amplitudes A_k^- y A_k^+ respectivamente. (c) Caso general de movimiento elíptico con eje mayor inclinado en un ángulo θ en sentido antihorario desde el este, donde el semieje mayor tiene una longitud $L_M = [A_k^+ + A_k^-]$ y el semieje menor una longitud $L_m = [A_k^+ - A_k^-]$. Recuperado de Thomson y Emery (2014).	54
5.1.	Histograma de la métrica de máxima penetración al norte de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.	58
5.2.	Histograma de la métrica de máxima penetración al oeste de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.	59
5.3.	Histograma de la métrica de extensión de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.	60
5.4.	Histograma de la métrica de área de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.	61
5.5.	Histograma de la métrica de circulación de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.	62
5.6.	Histogramas de porcentaje de ocurrencia de las métricas de la CL. Las líneas verticales rojas superpuestas muestran los valores medios. Recuperado de Leben (2005).	64
5.7.	Métricas de la CL referentes al remolino número 7. La banda roja señala la fecha de 10 de agosto de 1996 y la banda azul la fecha de 20 de octubre del mismo año.	68
5.8.	Histograma de la métrica de la estacionalidad de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo.	71
5.9.	Histograma de la métrica de la periodicidad de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo.	72
5.10.	Histograma de la métrica de los diámetros de los Remolinos de la Corriente del Lazo.	73

5.11. Remolino número 12. a) El 27 de febrero del 2002 un remolino con un diámetro mayor a 600 km se separó de la CL y b) ese mismo remolino se dividió en dos el 02 de marzo del 2002.	73
5.12. Diagrama de dispersión del periodo de separación de los remolinos (días) contra latitud de retraimiento (°N). Se indican el número del remolino correspondiente al periodo de separación y la latitud de retraimiento correspondiente al remolino anterior. La línea diagonal muestra la línea de tendencia, con coeficiente de correlación $R^2 = 0.3441$	74
5.13. Diagrama de dispersión del periodo de separación (días) contra el diámetro de los remolinos (km). Se indican el número del remolino correspondiente al periodo de separación y el diámetro correspondiente al remolino anterior. La línea diagonal muestra la línea de tendencia, con coeficiente de correlación de $R^2 = 0.4913$	75
5.14. Diagrama de dispersión del diámetro de los remolinos (km) contra la latitud de retraimiento (°N). Se indican el número del remolino correspondiente al diámetro y a la latitud de retraimiento. La línea diagonal muestra la línea de tendencia, con coeficiente de correlación de $R^2 = 0.4451$	76
6.1. Puntos escogidos para el análisis espectral enumerados para la isóbata de los 50 m (puntos amarillos) y la isóbata de los 200 m (puntos verdes), agrupados de acuerdo a la plataforma continental en donde se encuentran.	80
B.1. Contornos del Sistema de la Corriente del Lazo en los eventos de separación. El punto rojo indica la latitud de retraimiento de la Corriente del Lazo.	103
C.1. Espectros replicados de las componentes de velocidad de los puntos de la isóbata de los 50 m, aplicando la técnica de <i>zero-padding</i> . La línea vertical azul se encuentra en el periodo anual. La línea horizontal indica el nivel de confianza al 95%.	106
C.2. Espectros replicados de las componentes de velocidad de los puntos de la isóbata de los 200 m, aplicando la técnica de <i>zero-padding</i> . La línea vertical azul se encuentra en el periodo anual. La línea horizontal indica el nivel de confianza al 95%.	107
C.3. Espectros de las componentes rotatorias en sentido horario (color azul) y antihorario (color rojo) de los puntos de la isóbata de los 50 m. Los puntos negros indican los periodos significativos, a los cuales se les calcularon los coeficientes rotatorios r . Nótese que los ejes verticales no están en la misma escala.	108
C.4. Espectros de las componentes rotatorias en sentido horario (color azul) y antihorario (color rojo) de los puntos de la isóbata de los 200 m. Los puntos negros indican los periodos significativos, a los cuales se les calcularon los coeficientes rotatorios r . Nótese que los ejes verticales no están en la misma escala.	109

Índice de Tablas

5.1. Estadísticos de las métricas de la Corriente del Lazo comparados con los resultados de Leben (2005)..	65
5.2. Variación porcentual en los estadísticos de las métricas obtenidos en el trabajo de tesis con los publicados por Leben (2005).	66
5.3. Comparación de estadísticos de la métrica de circulación de la CL en el periodo del 1 de enero de 1993 al 1 de julio del 2004.	67
5.4. Eventos de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo registrados junto con sus métricas. Los nombres industriales de los remolinos se obtuvieron en la página https://www.horizonmarine.com/loop-current-eddies	69
5.5. Comparación del día de separación y del periodo de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo obtenidos en este trabajo con los reportados por Hall y Leben (2016).	77
6.1. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular de la plataforma <i>West Florida Shelf</i>	81
6.2. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular de la plataforma Texas-Luisiana.	81
6.3. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular de la plataforma Tamaulipas-Veracruz.	82
6.4. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular del Banco de Campeche.	83
6.5. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en la plataforma <i>West Florida Shelf</i>	85
6.6. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en la plataforma Texas-Luisiana.	86
6.7. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en la plataforma Tamaulipas-Veracruz.	87
6.8. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en el Banco de Campeche.	88
6.9. Sentido de rotación de la velocidad en los periodos significativos de los puntos seleccionados, agrupados de acuerdo con la isóbata en donde se ubican.	90

Acrónimos

ADT	<i>Absolute Dynamic Topography</i> - Topografía Dinámica Absoluta
AVISO+	<i>Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data</i> - Archivo, Validación e Interpretación de Datos Oceanográficos de Satélites
BC	Banco de Campeche
C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i> - Servicio de Cambio Climático de Copernicus
CL	Corriente del Lazo
CLS	<i>Grupo Collecte Localization Satellites</i>
CMEMS	<i>Copernicus Marine Environment Monitoring Service</i> - Servicio Europeo de Monitoreo del Medio Marino de Copernicus
CNES	<i>Centre National d'Études Spatiales</i> - Centro Nacional de Estudios Espaciales
DEP	Densidad Espectral de Potencia
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> - Transformada Discreta de Fourier
DT	<i>Delayed Time</i> - Tiempo Rezagado
DUACS	<i>Data Unification and Combination System</i> - Sistema de Combinación y Unificación de Datos
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> - Transformada Rápida de Fourier
GDR	<i>Geophysical Data Record</i> - Registro de Datos Geofísicos
LATEX	Plataforma continental de Texas y Luisiana
MDT	<i>Mean Dynamic Topography</i> - Topografía Dinámica Media

MSS	<i>Mean Sea Surface</i> - Superficie Media del Mar
NRT	<i>Near Real Time</i> - Tiempo Casi Real
PT	Potencia Total
r	Coefficiente rotatorio
RCL	Remolinos de la Corriente del Lazo
SCL	Sistema de la Corriente del Lazo
SLA	<i>Sea Level Anomaly</i> - Anomalía del Nivel del Mar
SSH	<i>Sea Surface Height</i> - Altura de la Superficie del Mar
SST	<i>Sea Surface Temperature</i> - Temperatura de la Superficie del Mar
TAVE	Plataforma continental de Tamaulipas y Veracruz
u	Velocidad geostrófica zonal
UGOS	Velocidad Geostrófica Absoluta: componente zonal
UGOSA	Anomalías de la Velocidad Geostrófica: componente zonal
v	Velocidad geostrófica meridional
VGOS	Velocidad Geostrófica Absoluta: componente meridional
VGOSA	Anomalías de la Velocidad Geostrófica: componente meridional
WFS	Plataforma continental del oeste de Florida

Capítulo 1

Introducción

El Golfo de México, el noveno cuerpo de agua más grande del mundo, es un mar semicerrado ubicado en el extremo sureste de América del Norte y limitado por las costas de México, Estados Unidos y Cuba. Es el hogar de diversos hábitats tales como bahías, estuarios, humedales, marismas, isla barrera, bosques de manglares, arrecifes de coral, arrecifes de coral profundos, playas de arena blanca, arrecifes de ostras, camas de esponja, entre otros (NOAA-NOS, 2008). A su vez, en la región del Golfo existen muchas rutas migratorias de vida silvestre, como aves, tortugas y tiburones ballena (Yoskowitz et al., 2013).

El Golfo contiene aproximadamente 2.5 millones de km³ de agua y una superficie de 1.5 millones de km², midiendo 1,600 km de este a oeste y 900 km de norte a sur. La zona de plataforma continental (<200 m) comprende el 38% del Golfo, el talud continental el 42% y las áreas abisales (>3000 m) el 20%. La cuenca tiene una profundidad media de 1,615 m, y su punto máximo se encuentra en la fosa de Sigsbee, entre los 3750–4,384 m (Darnell y Defenbaugh, 1990; Harte Research Institute [HRI], 2012 citado en Ellis y Dean, 2012; Moretzsohn et al., 2015).

El Golfo de México se conecta al sureste con el Mar Caribe a través del Canal de Yucatán y al este con el Océano Atlántico a través del Estrecho de Florida. Las corrientes a través del Mar Caribe, el Golfo de México y el Estrecho de Florida constituyen un componente importante de la circulación de giros subtropicales del Océano Atlántico Norte (Oey et al., 2005).

La circulación superficial en el Golfo de México está dominada por el Sistema de la Corriente del Lazo, el cual comprende a la corriente dominante intensa conocida como la Corriente

del Lazo y a los remolinos que de ella se desprenden. La Corriente del Lazo llega al Golfo de México penetrando a través del canal de Yucatán, para posteriormente realizar un recorrido en curva o en forma de lazo en la zona centro-este del Golfo y finalmente salir por el Estrecho de Florida. En su recorrido, esta corriente desprende remolinos anticiclónicos, mejor conocidos como los Remolinos de la Corriente del Lazo, que se desplazan hacia el oeste y se disipan al llegar al talud continental. Para estudiar el comportamiento del Sistema de la Corriente del Lazo, es necesario tener un monitoreo continuo de la corriente y de los remolinos.

El comportamiento del Sistema de la Corriente del Lazo se ha podido estudiar de manera precisa gracias a la altimetría satelital, la cual hace posible definir un contorno de la altura de la superficie del mar que sirva como proxy/indicador de la ubicación de la corriente y de los remolinos. El contorno de la altura del mar que Hamilton et al. (2000) seleccionaron para el rastreo del Sistema fue el de 17 cm, ya que éste coincide estrechamente con la ubicación de los gradientes máximos en la topografía y permite el seguimiento continuo de los remolinos durante su traslación a través del oeste del Golfo de México. También este contorno funciona bien como una definición para el núcleo de alta velocidad de la Corriente del Lazo en el este del Golfo.

Al tener un método eficaz para el rastreo del Sistema de la Corriente del Lazo, se pueden derivar métricas cuantitativas que nos ayuden a comprender mejor a este Sistema. Las métricas de la Corriente del Lazo son la máxima penetración al norte, la máxima penetración al oeste, la extensión (o perímetro), el área y la circulación de la corriente. Por el otro lado, las métricas de los Remolinos de la Corriente del Lazo son la estacionalidad de separación, el periodo de separación y el diámetro de los remolinos.

Si bien la circulación superficial en el Golfo de México está dominada por el Sistema de la Corriente del Lazo, también existe una circulación importante que se localiza en las plataformas continentales. Estas plataformas, que cubren un área de 584,516 km², son la plataforma del oeste de Florida, la plataforma de Texas y Luisiana, la plataforma de Tamaulipas y Veracruz, y el Banco de Campeche (Romero-Centeno et al., 2021). La circulación en las plataformas del Golfo se puede caracterizar principalmente por el esfuerzo del viento, por lo cual la estacionalidad del patrón de rapidez y dirección de los vientos se refleja en el patrón de circulación (Peters et al., 2021). De

esta manera, es importante estudiar la variabilidad temporal de las corrientes en diferentes regiones de las plataformas del Golfo dado su patrón de circulación variable a lo largo del año.

Una manera de estudiar la circulación en las plataformas continentales es mediante el análisis energético que proporcionan los espectros de Fourier y los espectros rotatorios, los cuales son descritos por Thomson y Emery (2014). En primer lugar, la Transformada Rápida de Fourier (FFT) se refiere al algoritmo más común –dada su eficacia computacional– que calcula la Transformada Discreta de Fourier y que es utilizado para resolver problemas de interferencia, comunicaciones, teoría de la probabilidad, criptografía, acústica, óptica, sistemas de control y muchos más; una representación usual que se obtiene a partir de la FFT es el periodograma, el cual es un método que estima la densidad espectral de potencia. A su vez, el análisis rotatorio de las corrientes implica la separación del vector de velocidad para una frecuencia especificada en componentes circulares rotatorias en sentido horario y antihorario; este método ha demostrado ser especialmente útil para investigar corrientes sobre topografía abrupta, movimientos inerciales generados por el viento, ondas de plataforma continental de frecuencia diurna y otras formas de flujo oscilatorio de banda estrecha. Ejemplos de estudios que han llevado a cabo estos análisis son Hayashi (1979), Molinari y Mayer (1982) y Expósito-Díaz et al. (2009).

Conocer e investigar la circulación del Golfo de México se puede aplicar a estudios de diferente naturaleza: dinámicos, físicos, químicos, biológicos, ecológicos, económicos, sociales, militares y muchos más.

El estudio del Sistema de la Corriente del Lazo a través de las métricas lo han llevado algunos autores como Leben (2005), aunque sus productos no son de acceso abierto. De aquí se enfatiza la necesidad de contar con una base de datos actualizada y de acceso abierto de las métricas del Sistema de la Corriente del Lazo, y que sea de utilidad para tener un monitoreo continuo de dicho Sistema.

Por otro lado, la variabilidad de la circulación superficial en las plataformas continentales del Golfo se ha reportado en varios estudios (por ejemplo, Cochrane y Kelly, 1986; Cho et al., 1998; Nowlin et al., 1998; Weisberg y He, 2003; Zavala-Hidalgo et al., 2003; Morey et al., 2005; Nowlin et al., 2005; Schmitz et al., 2005; Dubranna, et al., 2011; Zavala-Hidalgo et al., 2014), lo que nos otorga un panorama amplio de la estacionalidad de las corrientes en cada plataforma.

Realizar un análisis espectral extendido de la variabilidad de estas corrientes es de interés para el estudio de la circulación superficial del Golfo de México al incorporar las componentes circulares rotatorias de la velocidad.

Estas son las premisas que apuntan a la necesidad de realizar este trabajo de tesis, el cual tiene por objetivo general estudiar la variabilidad de la circulación superficial en el Golfo de México a partir de observaciones altimétricas, considerando tanto el Sistema de la Corriente del Lazo como las corrientes en distintas regiones de las plataformas continentales. Estos análisis pueden ser una herramienta de validación de las simulaciones numéricas realizadas con diferentes modelos numéricos de circulación general del océano (por ejemplo, HYCOM), llevadas a cabo por distintos grupos de investigación tanto nacionales como extranjeros.

Los objetivos particulares son:

- Sentar las bases para la generación de una base de datos actualizada y abierta del monitoreo del Sistema de la Corriente del Lazo a partir del cálculo de las métricas.
- Cuantificar la variabilidad de la circulación en las plataformas continentales del Golfo de México mediante un análisis espectral.

El presente trabajo consta de siete capítulos, estructurados con la finalidad de poder cumplir los objetivos. A continuación, se dará una breve descripción de los siguientes capítulos:

Capítulo 2. Métodos de observación del océano: altimetría satelital. Se menciona la importancia de los sistemas de teledetección satelital como una herramienta útil para el estudio y observación del océano. También se describe la altimetría satelital y se expone su principio, el cual tiene el propósito de obtener la variable de la topografía dinámica absoluta (ADT). Las ventajas y desventajas de la altimetría, y la base de datos altimétrica que se utiliza en la metodología son mencionadas seguidamente.

Capítulo 3. Circulación oceánica superficial en el Golfo de México. Se describen las dos características principales de la circulación superficial en el Golfo: el Sistema de la Corriente del Lazo y las corrientes que se encuentran en las plataformas continentales. Se destacan los estudios que se han hecho sobre ambas características.

Capítulo 4. Metodología. Se detallan los datos altimétricos utilizados en esta tesis. Este capítulo se divide en dos partes, donde se describen los marcos metodológicos utilizados para el estudio de las métricas del Sistema de la Corriente del Lazo y para el estudio de la variabilidad de las corrientes de las plataformas.

Capítulo 5. Métricas del Sistema de la Corriente del Lazo. Los resultados del monitoreo del Sistema de la Corriente del Lazo se colocan en este capítulo mediante los histogramas de todas las métricas. Los resultados se comparan con las observaciones publicadas en la literatura científica.

Capítulo 6. Variabilidad de las corrientes en superficie. Los resultados del análisis espectral de las corrientes en las plataformas continentales se muestran en este capítulo. Se destacan dos diferentes aspectos que se obtuvieron a partir de los espectros: las potencias totales de cada periodo y los coeficientes rotatorios de los periodos significativos.

Capítulo 7. Conclusiones. En este capítulo se analizan el cumplimiento de los objetivos, los aportes del trabajo de tesis y los futuros trabajos por parte de la comunidad científica que se pueden realizar a partir de este trabajo.

Capítulo 2

Métodos de observación del océano: Altimetría Satelital

Existe una gran cantidad de técnicas y métodos científicos y tecnológicos para el estudio del océano, muchos de los cuales tienen un elevado costo económico y de esfuerzo dada la gran extensión y complejidad de las interacciones que suceden dentro de él. Es por ello por lo que el desarrollo de la oceanografía satelital desempeña un papel clave en el estudio del océano. Los sistemas de teledetección satelital permiten muestrear regularmente diversos parámetros del océano a lo largo de cientos de kilómetros, que anteriormente eran difíciles o imposibles de medir (Robinson, 2010). Así, la oceanografía satelital dio paso a nuevas formas de estudiar y de entender al océano.

NOAA-NOS (2021) señala que los satélites son una herramienta que proporcionan una vasta información acerca del océano, siendo ejemplos la temperatura de la superficie del mar, el color del océano, los arrecifes de coral, y el hielo del mar y de lagos.

Generalmente, los satélites utilizan solamente un sensor, aunque depende del tipo de objetivos que se tengan. Robinson (2010) menciona que el muestreo bidimensional para cubrir la superficie del mar se logra utilizando un movimiento relativo entre la plataforma y el suelo y apuntando el sensor en un patrón de muestreo sistemático. Algunos sensores solo hacen observaciones descendentes a intervalos periódicos mientras el satélite se mueve sobre el suelo, por lo cual toman muestras en la superficie que está centrada en el punto nadir, es decir, el punto en la Tierra

inmediatamente debajo del satélite. Un altímetro de visualización nadir es un ejemplo de este tipo de sensor.

Los altímetros satelitales son aquellos que emiten pulsos regulares hacia la superficie de la Tierra y con base en ello se registra el tiempo de viaje, la magnitud y la forma de cada señal de retorno después de la reflexión desde la superficie, para poder medir la altura de la superficie del mar (SSH por sus siglas en inglés *Sea Surface Height*) a lo largo de las trayectorias (Robinson, 2010).

La idea de volar un altímetro de radar en el espacio para medir la altura del mar, de acuerdo con Fu (2010), se desarrolló rápidamente después del primer lanzamiento del satélite artificial (el Seasat en 1978). No obstante, fue hasta agosto de 1992 cuando se revolucionó la oceanografía satelital con el lanzamiento de la Misión TOPEX / Poseidon, el cual fue específico para observar la circulación oceánica y su variabilidad. Desde entonces hasta la actualidad han existido varias misiones altimétricas, mostradas en la Figura 2.1.

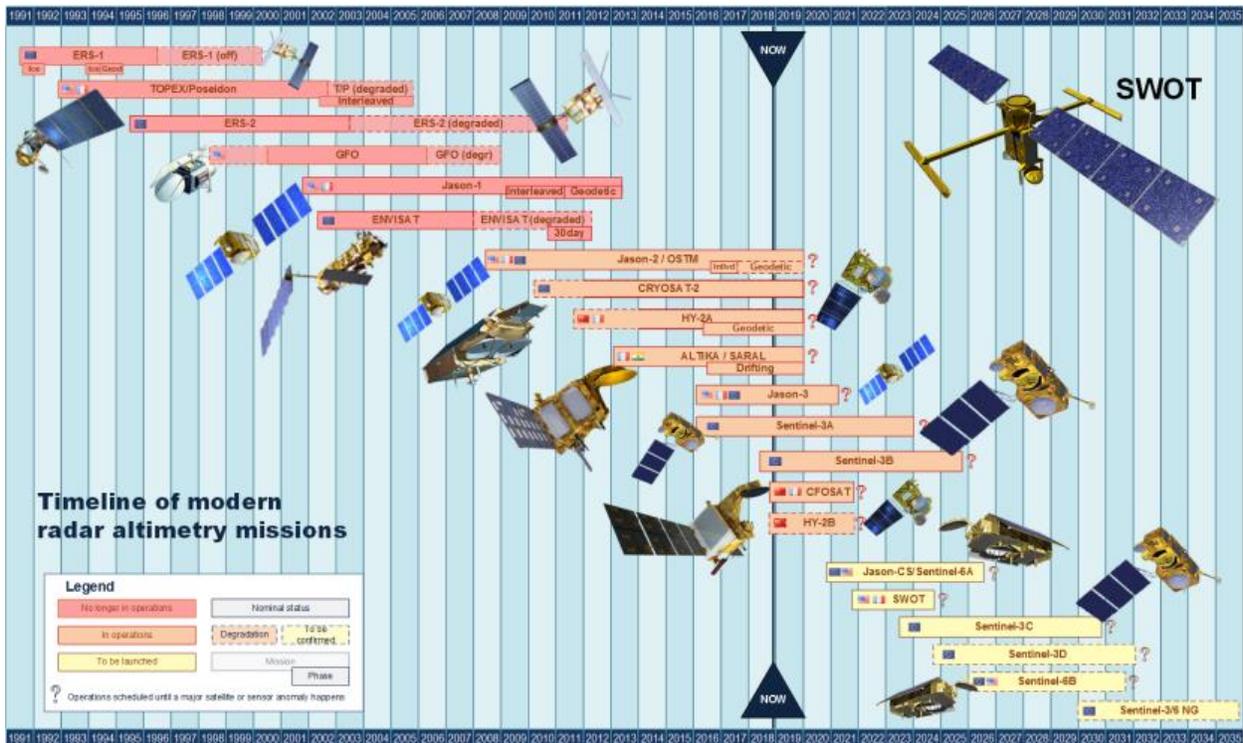


Figura 2.1. Cronología de las misiones de altimetría de radar modernas. Recuperado de Taburet et al. (2019).

Robinson (2010) menciona que los productos de datos de los altímetros se presentan primero como valores a lo largo de la trayectoria de SSH, la velocidad del viento y la altura significativa de las olas. Estos productos se incluyen en el Registro de Datos Geofísicos (GDR por sus siglas en inglés *Geophysical Data Record*), que también incorpora información auxiliar sobre las diversas correcciones aplicadas. Si bien cada agencia publica el GDR para su propio altímetro, se pueden encontrar datos donde se tiene información combinada de diferentes altímetros en el Sistema de Combinación y Unificación de Datos (DUACS por sus siglas en inglés *Data Unification and Combination System*), el cual se retomará en la sección 2.3.

Los datos combinados de múltiples altímetros, de acuerdo con Fu (2010), han permitido una amplia gama de avances en el estudio de la dinámica oceánica, incluyendo un conocimiento más detallado de la circulación general global del océano y, por primera vez, una oportunidad para poder rastrear el movimiento bidimensional de los remolinos de mesoescala y determinar sus trayectorias e interacción con la circulación media y la topografía oceánica.

2.1. Principio de la altimetría

Rio (2010) indica que, si bien la altimetría satelital permite las mediciones de SSH, lo que en realidad se busca en los estudios oceanográficos es la parte dinámica del océano. Dicha autora menciona que todos los sistemas de corrientes principales en los océanos que transportan calor y masa se pueden considerar, como primera aproximación, en equilibrio geostrófico, lo que significa que pueden derivarse simplemente por el conocimiento de la topografía dinámica absoluta del océano (ADT por sus siglas en inglés *Absolute Dynamic Topography*), el cual es el nivel del mar sobre un océano hipotético en reposo (el geoide). Para un mejor entendimiento, Smith (2010) señala que:

Si las mareas y corrientes en el océano y la atmósfera dejaran de moverse, de modo que las partes fluidas de la Tierra se posaran sobre las partes sólidas, con todas las partes girando juntas uniformemente como un cuerpo rígido, entonces el equilibrio hidrostático requeriría que la interfaz del océano-atmósfera (es decir, el nivel del mar) deba estar sobre una superficie de energía potencial constante del campo de gravedad de la Tierra. Esta superficie

equipotencial, la forma de equilibrio hidrostático para el nivel del mar en ausencia de mareas, corrientes y vientos, se denomina geoide marino.

Los altímetros satelitales miden la altura instantánea de la superficie del mar por encima de un elipsoide terrestre de referencia. Esta altura es la suma de la altura del geoide más la topografía dinámica asociada con los flujos del océano y las respuestas a los forzamientos atmosféricos y de las mareas. Si la altura del geoide se puede eliminar de las observaciones altimétricas, entonces la altura residual se puede interpretar directamente en términos de la dinámica del océano. (p. 181)

De esta manera se infiere que para pasar de la variable SSH (la registrada por los altímetros y la que se encuentra sobre el elipsoide de referencia) a la variable ADT (la que se encuentra referenciada al geoide) se debe realizar una serie de procesos o cálculos que AVISO (2011) y la página de DUACS (<https://duacs.cls.fr/faq/what-are-the-product-specification/different-sea-surface-heights-used-in-altimetry/>) desarrollan, y que se explicarán a continuación.

Como primera instancia, se debe utilizar un campo de superficie marina media (MSS por sus siglas en inglés *Mean Sea Surface*), el cual representa el perfil medio de SSH durante un periodo N (o periodo de referencia). A partir de MSS, se puede obtener la anomalía del nivel del mar (SLA por sus siglas en inglés *Sea Level Anomaly*) mediante la diferencia que tiene la primera con SSH; esto representa las pequeñas longitudes de onda de la señal dinámica en el periodo de referencia,

$$SLA_N = SSH - MSS_N \quad (2.1)$$

Después, se puede utilizar un campo de topografía dinámica media (MDT por sus siglas en inglés *Mean Dynamic Topography*), el cual representa la superficie media del mar por encima del geoide, para poder, finalmente, obtener ADT. Es importante destacar que tanto ADT como SSH son independientes del periodo de referencia,

$$ADT = SLA_N + MDT_N \quad (2.2)$$

Dada la geometría de las variables, MDT es el resultado de la diferencia entre el geoide y MSS ,

$$MDT_N = MSS_N - \text{Geoide} \quad (2.3)$$

Las relaciones entre las variables descritas anteriormente se observan gráficamente en la Figura 2.2.

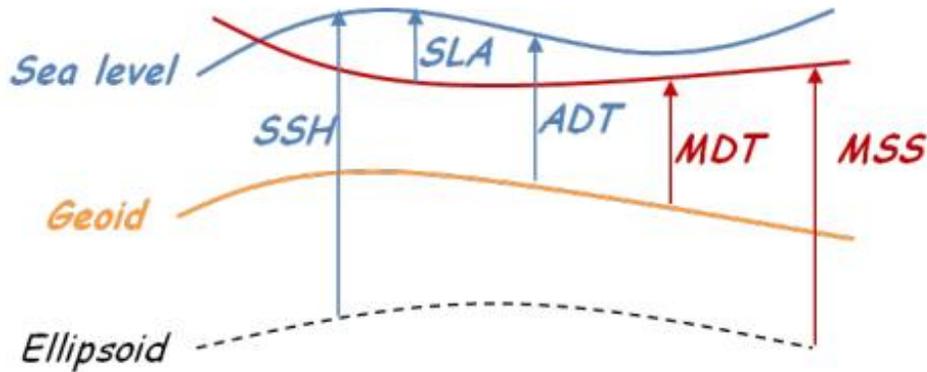


Figura 2.2. Variables utilizadas en la altimetría. SSH es la altura del nivel del mar, MSS la superficie media del mar, SLA la anomalía del nivel del mar, MDT la topografía dinámica media, y ADT la topografía dinámica absoluta. Recuperado de AVISO (2011).

También hay que añadir que, de acuerdo con Chelton et al. (2001), las observaciones de altimetría satelital del nivel del mar, junto con el conocimiento del geoide, proporcionan información global sobre la velocidad de las corrientes en la superficie del océano. Esto se debe a que si se considera que las corrientes oceánicas están en balance geostrófico, las velocidades de éstas se pueden calcular con precisión a partir del gradiente de presión en una superficie equipotencial gravitacional. La aproximación geostrófica hace referencia al balance entre el gradiente de presión horizontal y la componente horizontal de la velocidad multiplicado por el parámetro de Coriolis; la velocidad derivada de esta relación se denomina velocidad geostrófica (Pedlosky, 1987).

Arbic et al. (2012) mencionan que las velocidades geostróficas se obtienen a partir de las primeras derivadas de la altura de la superficie del mar η :

$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2.4)$$

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2.5)$$

donde u es la velocidad zonal (siendo positivas las velocidades hacia el este), v la velocidad meridional (siendo positivas las velocidades hacia el norte), g la aceleración gravitacional, f el parámetro de Coriolis, x la coordenada espacial zonal y y la coordenada espacial meridional.

2.2. Ventajas y desventajas

La altimetría satelital fue un gran paso para la oceanografía y actualmente contribuye significativamente en diversas investigaciones y aplicaciones de esta índole. Para destacar la importancia de la altimetría veamos el contraste de este método con otros en el estudio de la circulación del Golfo de México, dado que es el tema principal de esta tesis.

La comunidad científica concuerda que los métodos para estudiar la circulación en el Golfo de México (en particular al Sistema de la Corriente del Lazo o SCL) eran, de muchas maneras, imprecisas antes de la altimetría. Hall y Leben (2016) explican que en la época pre-altimétrica (es decir, antes de 1993) la técnica más utilizada para el estudio del SCL era la medición de la temperatura de la superficie del mar (SST por sus siglas en inglés *Sea Surface Temperature*) con imágenes infrarrojas satelitales, aunque también se utilizaron secciones de temperatura, salinidad y presión a lo largo de las trayectorias de barcos, las boyas de deriva rastreadas por satélite (*drifting buoys*) y misiones satelitales del color del océano (*Coastal Zone Color Scanner*).

Los datos infrarrojos satelitales fueron la mayor base para el estudio del SCL, los cuales aún siguen siendo muy valiosos por su alta resolución horizontal. Sin embargo, su limitación principal es durante el verano, cuando las temperaturas de la superficie son uniformemente cálidas en el Golfo de México y no permiten definir el contorno de la Corriente del Lazo (CL) correctamente (Sturges y Leben, 2000).

De esta manera, cuando se inició la era moderna de la altimetría, en enero de 1993, el monitoreo continuo de la CL fue posible utilizando el muestreo multisatélite (Leben et al., 2002), ya que la variable medida por los satélites, la altura de la superficie del mar, está fuertemente relacionada con los patrones de circulación del océano, donde valores altos de esta variable pueden indicar una característica de circulación de mesoescala anticiclónica (Müller-Karger et al., 2015).

Sturges y Leben (2000) indican que, aunque el mapeo altimétrico muestra menos detalles horizontales que los datos de infrarrojo, la principal ventaja del primero es la ausencia de pérdidas de datos de las nubes o de la uniformidad de la temperatura de la superficie en verano, por lo cual la altimetría asegura que los eventos de verano se registren de manera confiable. Además, la altimetría permite estimar las corrientes superficiales. De la misma manera, Ohlmann et al. (2001) mencionan que los datos altimétricos, en especial la combinación de datos de múltiples altímetros, pueden resolver los remolinos de mesoescala que se presentan en el Golfo.

Ahora bien, a pesar de que la altimetría satelital fue un paso grande para las mediciones oceanográficas, este método tiene una clara desventaja: la superficie del geoide que se utiliza para el cálculo del MDT no es precisa a pequeñas escalas (menores a 100 km) de acuerdo con la página de DUACS (<https://duacs.cls.fr/faq/what-are-the-product-specification/altimeter-reference-period-and-absolute-reference/>). Este problema se ha estado resolviendo con la mejora del cálculo del geoide. Desde el primer cómputo del modelo de geoide global, basado en el análisis de la perturbación de la órbita del satélite, se han visto muchos cambios reflejados en los avances de los lanzamientos de misiones espaciales dedicadas al estudio del campo de gravedad, como lo es CHAMP (2000), GRACE (2002) y GOCE (2009); este último ha sido un satélite exitoso por su capacidad de resolver, por primera vez, las escalas espaciales del geoide hasta unos 100 km con precisión de centímetros (Rio, 2010).

Otras misiones futuras tienen como meta poder mejorar la capacidad de la altimetría, tal como dicta el Estudio Decadal del Consejo Nacional de Investigación de los EE. UU (*US National Research Council Decadal Survey*), el cual recomendó un nuevo concepto de misión nombrado SWOT, que tiene como objetivo abordar observaciones de alta resolución de la elevación del agua tanto en los océanos como en las aguas superficiales terrestres. Esta misión, que se planea lanzar

a finales del 2022, proporciona una cobertura amplia tal que se equipara con 10 altímetros convencionales de aspecto nadir (Fu, 2010).

La segunda desventaja que tiene la altimetría satelital la describe Robinson (2010), y se refiere a una falta de confiabilidad de las observaciones del altímetro en los mares costeros y dentro de unos 200 km de distancia desde la costa a mar adentro. Esto se debe a que la precisión de las correcciones que se le aplican a los altímetros (es decir, el procesamiento) para estimar la altura de la superficie del mar se ve comprometida por la proximidad a la costa o por el comportamiento diferente en los mares de las plataformas continentales en comparación con el océano abierto. Los factores que introducen problemas en el procesamiento del altímetro son diversos, e incluyen: la contaminación de las señales que presenta tanto el altímetro como el radiómetro de microondas que lo acompaña, cuando la sección que se muestrea contiene algo de tierra; la incertidumbre de las correcciones de las mareas en las plataformas, donde las amplitudes de éstas suelen ser mucho mayores que en el océano abierto y más difíciles de predecir debido a la dinámica de las mareas no lineal y a las interacciones que tienen éstas con las corrientes impulsadas por el viento; también, es más difícil eliminar los efectos atmosféricos (viento y presión) de la anomalía de la altura de la superficie del mar sobre los mares de las plataformas.

Dado que, resumiendo a Robinson (2010), en los primeros años de la altimetría el principal objetivo era medir la circulación oceánica a gran escala y observar procesos en el mar lejos de la tierra, los datos costeros eran ignorados. Sin embargo, gracias al avance de la altimetría, actualmente se han buscado técnicas para mejorar la precisión que poseen los datos en la zona costera. Smith et al. (2008) explican que se han llevado a cabo talleres cuyo propósito es explorar los desafíos y oportunidades de la altimetría en la zona costera (por ejemplo, mejorar la medición del tiempo de viaje del radar, corregir el tiempo del viaje por el retraso del agua atmosférica, disminuir el sesgo del estado del mar, entre otros). La Comunidad Internacional de Altimetría Costera (<http://www.coastalt.eu/>) ha realizado hasta este momento 12 de estos talleres nombrados como *Coastal Altimetry Workshop* (www.coastalaltimetry.org, último acceso, 07 de febrero 2022).

Claramente, la altimetría satelital brinda datos confiables a comparación de otros métodos de observación del océano, lo que lo hace una técnica bastante utilizada en ámbitos oceanográficos; en particular, la altimetría fue de gran utilidad para determinar las características a mesoescala,

como la separación de Remolinos de la Corriente del Lazo (RCL). Sin embargo, cuando se utilicen los datos altimétricos, hay que considerar que existen imprecisiones en el cálculo de la topografía dinámica debido a los errores de la medición del geoide, así como datos inconcretos en zonas costeras y mares de plataforma.

2.3. Base de datos de altimetría

A principios de este capítulo se mencionó que se han conseguido combinar datos de diferentes altímetros para tener una mejora en su resolución, y que éstos se encuentran en el Sistema de Combinación y Unificación de Datos (DUACS). Este sistema, siguiendo a Taburet et al. (2019), es el sistema de procesamiento CNES / CLS (por sus siglas en francés *Centre National d'Études Spatiales* y *Collecte Localisation Satellites*, respectivamente) que proporciona productos del nivel del mar de altimetría satelital para aplicaciones en tiempo casi real, de unas pocas horas a un día (NRT por sus siglas en inglés *Near Real Time*) como en Tiempo Rezagado, de unos pocos meses (DT por sus siglas en inglés *Delayed Time*); en particular, DT es el que se recomienda para estudios climáticos (<https://duacs.cls.fr/duacs-system-description/processing-steps-overview/>).

Taburet et al. (2019) describen cómo opera DUACS. Los principales datos de entrada son los GDR producidos por la NASA o CNES (para las misiones T / P, Jason-1, Jason-2), ESA (ERS1, ERS2, ENVISAT) y NOAA (GEOSAT, GFO). Una vez adquiridas, la secuencia de procesamiento DUACS se puede dividir en los siguientes pasos: adquisición, homogeneización, control de calidad de los datos de entrada, calibración cruzada de múltiples misiones, generación de SLA a lo largo de las trayectorias, mapeo de múltiples misiones y control de calidad final.

Anteriormente, la producción operativa de los productos de altímetro del nivel del mar DUACS eran distribuidos por CNES / AVISO. AVISO+ (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data*, cuya página oficial es <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>) es un servicio creado por CNES para procesar, archivar y distribuir datos y productos de misiones de satélites altimétricos. Sin embargo, desde abril del 2017 el Servicio de Monitoreo Marino y Ambiental de Copernicus (CMEMS por sus siglas en inglés *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*) se ha hecho cargo de todo el procesamiento y la distribución

de la altura de anomalías del nivel del mar de múltiples misiones a lo largo de las trayectorias o en mallas, y de la topografía dinámica absoluta y productos derivados (<https://duacs.cls.fr/faq/2017-aviso-cmems-correspondance/>).

Hoy en día, el sistema DUACS ofrece productos de altímetro satelital a nivel del mar para diferentes servicios de Copernicus, principalmente para la CMEMS, la cual proporciona información de referencia regular y sistemática para el océano global y los mares regionales europeos, así como para el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S o *Copernicus Climate Change Service*), el cual proporciona acceso a varios indicadores e índices climáticos (<https://duacs.cls.fr/history-and-context/>). En la Figura 2.3 se muestra de manera esquemática la distribución de los productos DUACS. La configuración de la CMEMS incluye todos los altímetros disponibles de 1992 hasta la actualidad, los cuales se muestran en la Figura 2.4.

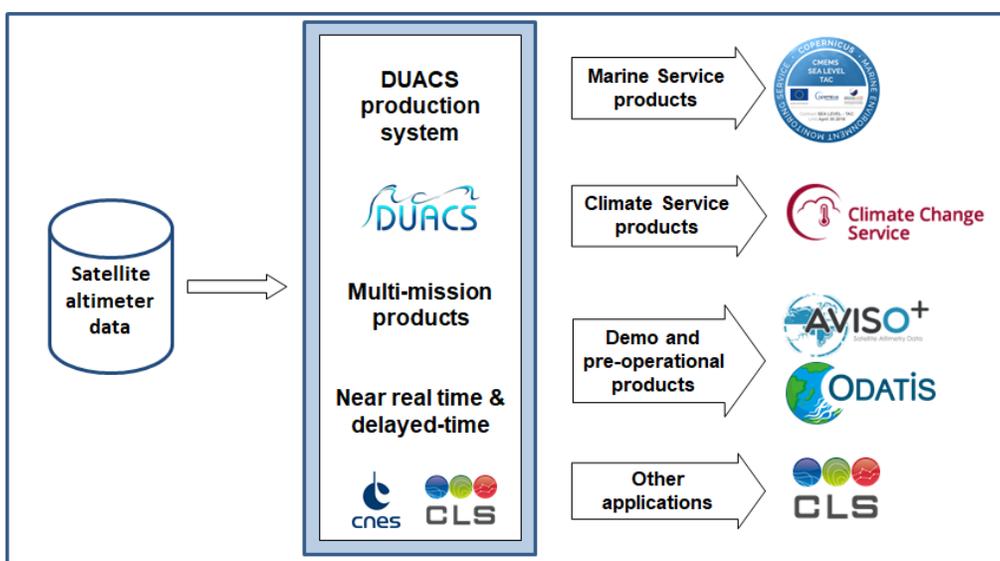


Figura 2.3. Distribución de productos DUACS. Recuperado de <https://duacs.cls.fr/history-and-context/>

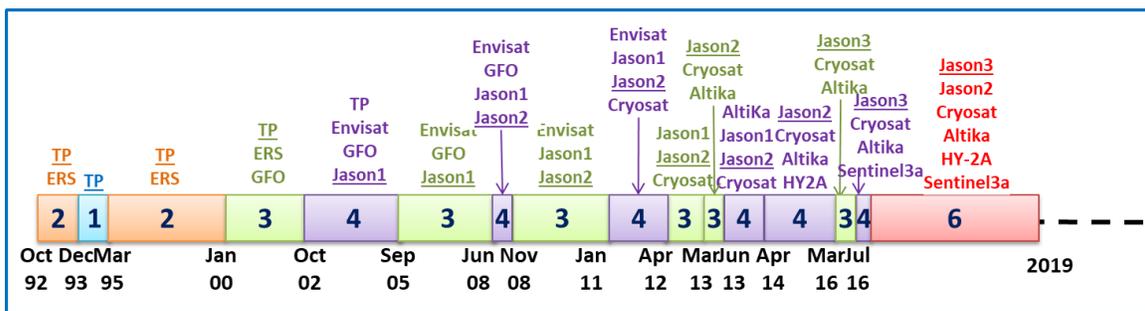


Figura 2.4. Número de altímetros utilizados para los productos CMEMS. Recuperado de <https://duacs.cls.fr/faq/cmems-and-c3s-duacs-altimeter-sea-level-products/>

Capítulo 3

Circulación oceánica superficial en el Golfo de México

La dinámica del Golfo de México, de acuerdo con Zavala-Hidalgo et al. (2014), se asocia principalmente con la CL y los remolinos que de ella se desprenden. No obstante, el forzamiento atmosférico local también juega un papel importante: la circulación en las plataformas continentales es generada principalmente por la variación estacional del esfuerzo del viento, el cual se vincula con el transporte de aguas con diferentes características de temperatura y salinidad. En los siguientes subcapítulos se describirán estos dos tipos de circulación.

También existen otras dos características relevantes en la circulación del Golfo de México. La primera de ellas es la corriente de frontera occidental reportada por Sturges y Blaha (1976), la cual es producto del rotacional del esfuerzo del viento junto con la rotación y curvatura de la Tierra. La segunda es referente al giro ciclónico semipermanente que predomina en la bahía de Campeche, centrado cerca de 20°N y 95°W , que es generado por el esfuerzo del viento y la topografía e interacción de remolinos, especialmente los RCL (Vázquez de la Cerda et al., 2005; DiMarco et al., 2005; Pérez-Brunius et al., 2013; Zavala-Sansón, 2019).

3.1. Sistema de la Corriente del Lazo

El SCL es un sistema de circulación oceánica del Golfo de México compuesto por un flujo principal, la CL, y los remolinos anticiclónicos que se desprenden de dicha corriente, los RCL.

Este sistema, al formar parte de la circulación del Océano Atlántico, sirve como vía para el transporte de calor, sal, nutrientes y material biológico desde el Mar Caribe al Atlántico Norte y, por lo tanto, juega un papel importante en la definición del tiempo y el clima de la región (Müller-Karger et al., 2015). De igual manera, el SCL afecta todas las actividades económicas y de exploración que se desarrollan en el Golfo, por ejemplo, la exploración petrolera (NOAA-NOS, 2008; Yoskowitz et al., 2013).

3.1.1. Corriente del Lazo

La CL, la característica dominante de la circulación del Golfo de México, forma parte del sistema de las corrientes de frontera occidentales del Océano Atlántico Norte. Ingresa al Golfo de México a través del Canal de Yucatán (en donde se conoce como la Corriente de Yucatán), gira anticiclónicamente hacia el este en forma de lazo extendiéndose al norte de la cuenca, y sale del Golfo por el Estrecho de Florida (Ohlmann et al., 2001; Leben, 2005; Oey et al., 2005; Müller-Karger et al., 2015; Romero-Centeno et al., 2021). Esta corriente, con una velocidad máxima que oscila entre 1.5 y 1.8 m·s⁻¹ (Oey et al., 2005), es la principal fuente de energía, variabilidad e impulso de la mayor parte de la circulación dentro del Golfo de México (Ohlmann et al., 2001).

La CL evoluciona en el tiempo aumentando su penetración hacia el noroeste en el curso de varios meses, pudiendo llegar a las cercanías del delta del río Mississippi (Müller-Karger et al., 2015) y, a intervalos irregulares, se vuelve lo suficientemente grande como para desprender grandes anillos anticiclónicos conocidos como los RCL. Inmediatamente después de arrojar un remolino, la CL se retrae hacia el sur, favoreciendo un flujo más directo entre el canal de Yucatán y el estrecho de Florida (Leben, 2005; Müller-Karger et al., 2015; Romero-Centeno et al., 2021). Dicho proceso se puede apreciar en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Sistema de la Corriente del Lazo. *Loop Current* denota la Corriente del Lazo y *Loop Eddy* denota un Remolino de la Corriente del Lazo. Recuperado de Hosansky (2011).

3.1.2. Remolinos de la Corriente del Lazo

La zona central del Golfo de México, excluyendo las plataformas continentales, está poblada todo el tiempo de remolinos (Oey et al., 2005; Schmitz et al., 2005) tanto ciclónicos (de núcleo frío) como de anticiclónicos (o de núcleo cálido). Los más estudiados, los RCL, son altamente energéticos y ocasionan corrientes intensas que pueden penetrar varios cientos de metros en la columna de agua y, por lo tanto, tienen una influencia significativa en el calor y la salinidad en todo el Golfo (Ohlmann et al., 2001; Zavala-Hidalgo et al., 2014).

Aunque los RCL no tienen un comportamiento estacional, sí tienen trayectorias preferidas (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Vukovich, 2007). Éstos, al desprenderse, inician una migración hacia el oeste de la cuenca con una duración de 2 a 4 meses (Müller-Karger et al., 2015 y referencias ahí incluidas) y con una velocidad media de aproximadamente $2\text{--}5 \text{ km}\cdot\text{día}^{-1}$ (Elliott, 1982; Vukovich y Crissman, 1986; Oey, 1996; Nowlin et al., 2000; Lee y Mellor, 2003; Vukovich, 2007), para posteriormente disiparse al llegar al talud continental entre el norte de Veracruz y el sur de Texas (Romero-Centeno et al., 2021).

Los RCL, justo en el momento de su separación, tienen un tamaño de diámetro de 200–400 km (Elliott, 1982; Oey, 1996; Lewis et al., 1989; Vukovich y Crissman, 1986; Hamilton et al.,

2016), aunque éste disminuye cuando llegan al talud continental, del orden de 100–200 km (Vukovich, 2007). Sus velocidades se han reportado que varían de 50–75 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Kirwan et al., 1984; Lewis et al., 1989) hasta corrientes que superan más de 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Forristall et al., 1992). Cuentan con una extensión vertical de 800–1,000 m y, en su interior, la profundidad de la termoclina aumenta considerablemente (Nowlin et al., 2000; Hamilton et al., 2016; Romero-Centeno et al., 2021).

Comúnmente, en la periferia de los RCL se observan remolinos ciclónicos con diámetro menor pero con corrientes de magnitudes similares (ver Figura 3.2). Este campo de remolinos crea corrientes intensas y redistribuye las aguas calientes y frías de las capas superficiales, así como el plancton y, en algunos casos, los contaminantes (Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte, 2006).

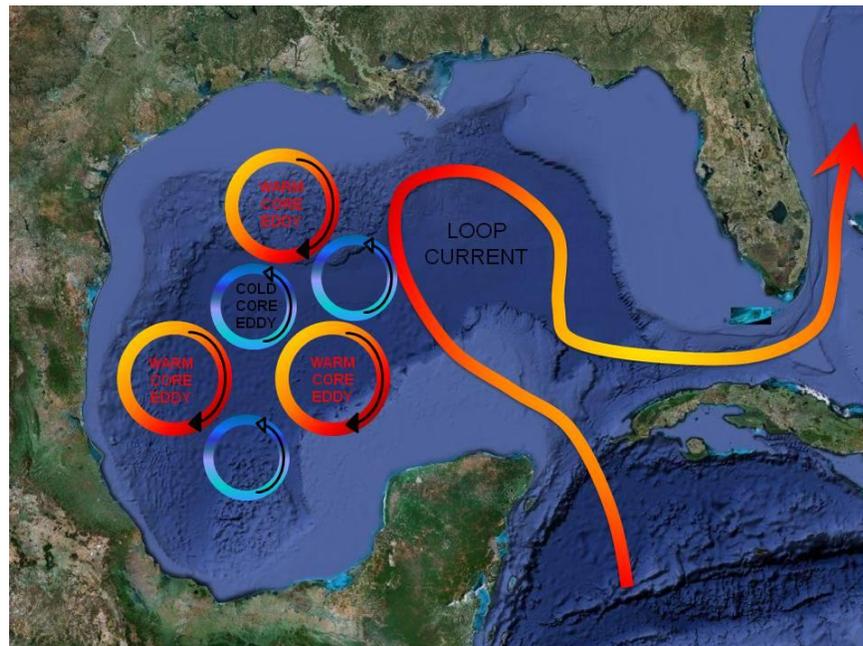


Figura 3.2. La Corriente del Lazo y los remolinos producidos. Recuperado de Ellis y Dean (2012).

Los periodos entre los eventos de separación de los RCL son muy variables: en algunos años no se observa ninguna separación y en otras ocasiones pueden ocurrir hasta tres separaciones en un mismo año (Müller-Karger et al., 2015; Hall y Leben, 2016). Varios autores han registrado sus observaciones de las separaciones de los remolinos, en los que se encontró que el periodo de separación de remolinos varía de 0.5–18.5 meses (Sturges y Leben, 2000; Leben, 2005; Vukovich, 2007; Hall y Leben, 2016).

Los intervalos de periodo de separación de los remolinos se agrupan a los 6 y 11 meses, y un modo secundario a los 9 meses, de acuerdo con los resultados de Leben (2005). Dicho autor hizo énfasis en la ausencia del pico anual, especulando que se debe a un efecto de frecuencia de pulsación (*beat-frequency effect*), es decir, la potencia a menor frecuencia modula la potencia en el periodo anual, dando lugar al pico espectral observado. Desafortunadamente, para verificar dicha hipótesis se requiere una serie temporal más larga.

Asimismo, Leben (2005) encontró una relación aparente entre el retraimiento de la CL después de la separación de los RCL y el periodo posterior de los eventos de separación. Sus resultados muestran que los retraimientos más hacia el sur de la CL están asociados con periodos de separación más largos (ver Figura 3.3). Un resultado semejante lo hallaron Alvera-Azcárate et al. (2009), quienes indicaron que existe una tendencia donde los remolinos más grandes son seguidos por periodos más largos sin desprendimiento de remolinos; su explicación radica en dos razones: la pérdida de volumen, y el tamaño y forma de la CL. Para el primer caso se tiene que la CL retrocede bastante hacia el sur después de que se desprende un remolino grande, y por lo tanto ésta necesita un periodo más largo para volver a alcanzar un tamaño en el que pueda arrojar un nuevo remolino; caso contrario, los remolinos más pequeños desencadenan una pérdida de volumen menor por lo que la CL puede penetrar hacia el noroeste y arrojar un remolino adicional en un periodo más corto. Para el segundo caso, se ha visto que los remolinos más grandes se desprenden a distancias cercanas a Cuba cuando la corriente está compacta, en tanto que los remolinos pequeños ocurren cuando la CL tiene una gran intrusión en el Golfo y es alargada.

De ahí Alvera-Azcárate et al. (2009) infirieron que el retroceso hacia el sur de la CL es una consecuencia del tamaño de los remolinos, y estos dos factores afectan el periodo de separación subsiguiente. Este proceso, por lo tanto, puede ser el primer indicador de “pronóstico” significativo para predecir una métrica del SCL estadísticamente (Leben, 2005).

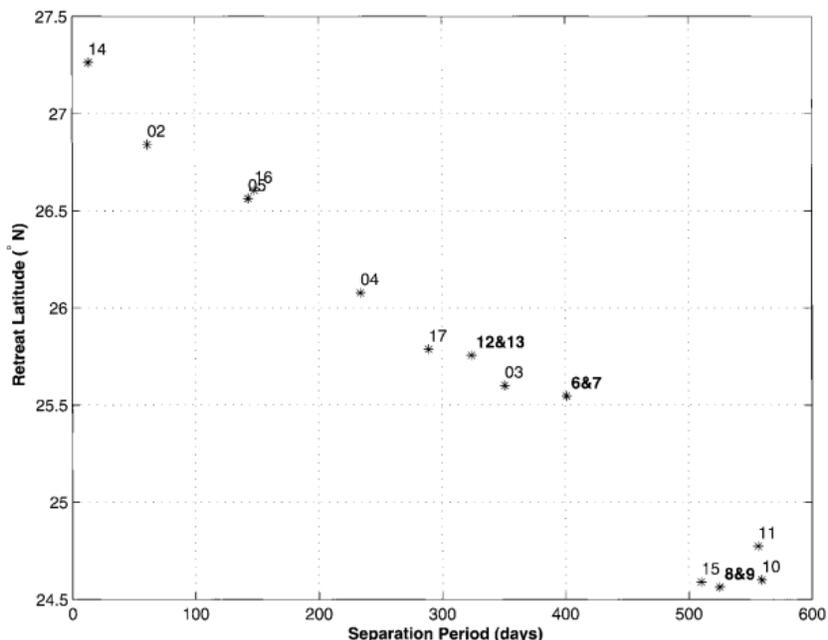


Figura 3.3. Gráfica del periodo de separación contra la latitud de retraimiento de la Corriente del Lazo inmediatamente después de la separación del remolino anterior. Se combinaron los eventos de separación 6-7, 8-9 y 12-13. Recuperado de Leben (2005).

Aunque se han realizado varios estudios de la frecuencia de los eventos de separación de los RCL, aún se desconoce el proceso que gobierna la variabilidad de éstos. Se han hecho propuestas de los posibles mecanismos que controlan la variabilidad, siendo los más conocidos las condiciones de aguas arribas (*upstream conditions*) que influyen en la circulación del Golfo, especialmente la conexión Atlántico-Caribe-Golfo (Murphy et al., 1999; Oey et al., 2003, Richardson, 2005), vínculos con el transporte del Canal de Yucatán (Oey, 1996; Bunge et al., 2002; Candela et al., 2003; Ezer et al., 2003; Athié et al., 2020) y la influencia de los remolinos periféricos ciclónicos y profundos (Vukovich y Maul, 1985; Lee et al., 1995; Fratantoni et al., 1998).

El SCL tiene una dinámica compleja que aún no se ha resuelto en su totalidad, por lo que es importante el estudio continuo de éste. Y, como mencionan Sturges y Leben (2000) y Oey et al. (2005), una condición necesaria para que un modelo básico del Golfo de México sea relevante es que represente adecuadamente las características observables de la CL y su campo de remolinos, describiendo correctamente los eventos de separación.

3.2. Circulación en las plataformas continentales

Las plataformas continentales son regiones marinas cuya profundidad generalmente es menor a los 200 m (dependiendo del quiebre de la plataforma), por lo cual son zonas próximas a la costa. Estas regiones costeras son importantes porque es ahí donde la mayoría de los nutrientes, contaminantes y sedimentos se introducen en el océano, y donde se generan y dispersan la mayoría de las larvas (Gelfenbaum, 2005).

Dinámicamente, las amplias plataformas continentales del Golfo de México están aisladas de la circulación oceánica profunda debido a las restricciones de movimiento por el litoral, la topografía, la conservación de vorticidad potencial, la influencia de la descarga de ríos, así como la importancia de la fricción de fondo por la profundidad relativamente baja (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Zavala-Hidalgo et al., 2014). Dadas estas diferencias en los procesos físicos, las plataformas cuentan con una circulación particular. Las corrientes en las plataformas, que a menudo se consideran formadas por una componente a lo largo de la costa y otra componente perpendicular a la costa, se clasifican de manera general en corrientes impulsadas por ondas, corrientes de marea, corrientes impulsadas por el viento y plumas boyantes, esta última generada por flujos de agua dulce de ríos y/o estuarios (Gelfenbaum, 2005).

No obstante, la circulación encontrada en varias regiones oceánicas, como lo es en el Golfo de México, se puede caracterizar solamente por el forzamiento del esfuerzo del viento. Los vientos contribuyen al bombeo vertical de nutrientes y a la mezcla de propiedades biogeoquímicas en las capas superiores del océano, así como en el equilibrio del flujo de calor y al intercambio de gases entre la superficie del océano y la atmósfera (Müller-Karger et al., 2015). La respuesta al forzamiento local se da principalmente en la plataforma interna (es decir, la más cercana a la costa) en especial cuando las plataformas son anchas (Weisberg y He, 2003; Schmitz et al., 2005; Zavala-Hidalgo et al., 2014).

De acuerdo con Apel (1987) y Talley (2011), el esfuerzo del viento se comunica en la superficie del océano a través de procesos viscosos (friccionales) que se extienden varias decenas de metros en el océano en una capa límite superficial conocida como capa de Ekman, la cual tiene una profundidad media de 10 a 100 m. Debido a la rotación de la Tierra, la fuerza de Coriolis hace que el agua superficial en esta capa se desvíe en superficie en un ángulo de 45° a la derecha

(izquierda) en el Hemisferio Norte (Sur) con respecto a la dirección del esfuerzo del viento. En profundidad, debido a la fricción, cada capa de agua tiene el mismo efecto de desviación que la capa de arriba, pero con un módulo de velocidad menor; esta estructura decae en forma de espiral, como se representa en la Figura 3.4. Integrando todo el flujo de la capa de Ekman por unidad de área, se obtiene el transporte de masa total, o transporte de Ekman, el cual se escribe de la forma vectorial:

$$\vec{M} = -\frac{1}{f} \hat{k} \times \vec{\tau} \quad (3.1)$$

donde $\vec{\tau}$ es el esfuerzo del viento, \hat{k} el vector unitario en la dirección vertical y f el parámetro de Coriolis.

De esta manera se muestra que el transporte de Ekman está orientado en ángulo recto con la dirección del esfuerzo del viento, a la derecha en el Hemisferio Norte. Gelfenbaum (2005) explica que cuando el viento sopla paralelo a la costa y el transporte de Ekman se aleja de la costa el nivel del mar disminuye, lo que induce un gradiente de presión dirigido hacia la costa que, cuando se equilibre con la fuerza de Coriolis, conduce a un flujo geostrófico paralelo a la costa en la misma dirección que el viento. Además, el agua a profundidad asciende para reemplazar el agua superficial que se había alejado. Este proceso se conoce como *upwelling* (“afloramiento”, “surgencia”). Por el otro lado, cuando el viento sopla en dirección opuesta el transporte de Ekman se dirige hacia la costa, lo que favorece condiciones de *downwelling* (“hundimiento”), donde el nivel del mar sube en la costa a medida que el agua encontrada ahí es forzada hacia la profundidad (se hunde).

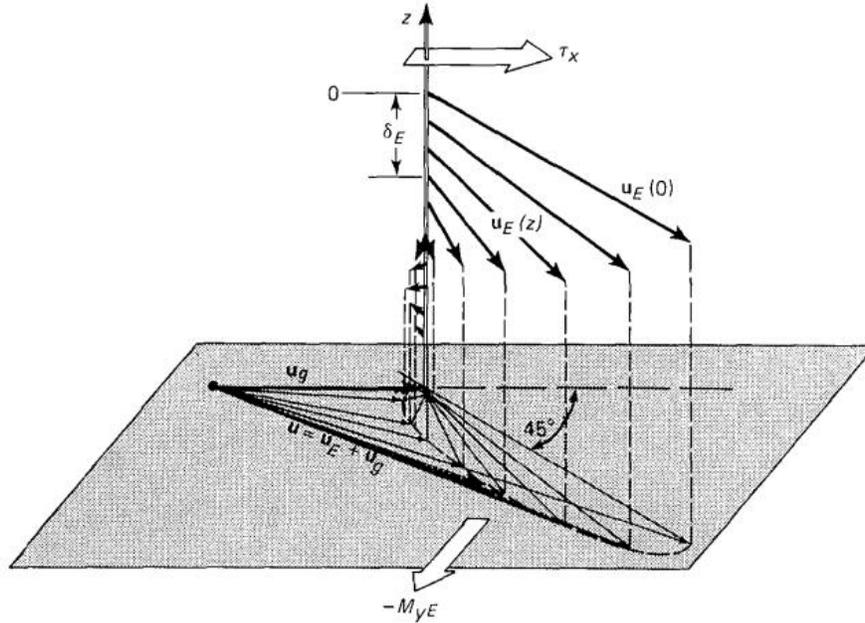


Figura 3.4. Hodógrafa de la capa límite de la superficie oceánica para el Hemisferio Norte. El esfuerzo del viento se dirige hacia el este. La velocidad superficial de Ekman, $u_E(0)$, está a la derecha del viento a 45° , y continúa rotando y disminuyendo con la profundidad. Si los vectores de velocidad se proyectan en un plano horizontal, sus puntas forman la espiral de Ekman. A varias profundidades de Ekman, δ_E , la velocidad se fusiona con la velocidad geostrofica, u_g . Recuperado de Apel (1987).

En el Golfo de México, el esfuerzo del viento tiene una estacionalidad en su dirección e intensidad, generando periodos de condiciones favorables para *upwelling-downwelling*. La dirección de estos vientos, que son parte de los vientos alisios, está determinada por la posición estacional de los sistemas de alta presión, siendo los patrones los que se explicarán a continuación (ver Figura 3.5 y 3.6). Durante el verano (de abril a septiembre), el viento gira hacia el norte en el noroeste del Golfo. Entre mayo y agosto, los vientos son más intensos en el oeste del Golfo y más débiles en el noreste, con este patrón más pronunciado en julio, el cual se ve afectado por el ingreso en el Golfo de México de ciclones tropicales entre mayo y noviembre. En septiembre, la llegada al Golfo de los frentes fríos provenientes del noroeste de Estados Unidos (época que dura hasta mayo) contribuye a tener vientos más intensos con dirección al sur, una mayor presión atmosférica y temperaturas más bajas. Durante el otoño (de octubre a noviembre), el viento es principalmente hacia el oeste, con una pequeña componente hacia el sur; en dicha época la componente meridional se intensifica en el golfo occidental por el efecto de bloqueo de la cordillera de la Sierra Madre Oriental, lo que genera una intensa componente de viento hacia el sur en la Bahía de Campeche,

patrón que se mantiene hasta febrero y es más evidente en diciembre (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Zavala-Hidalgo et al., 2014).

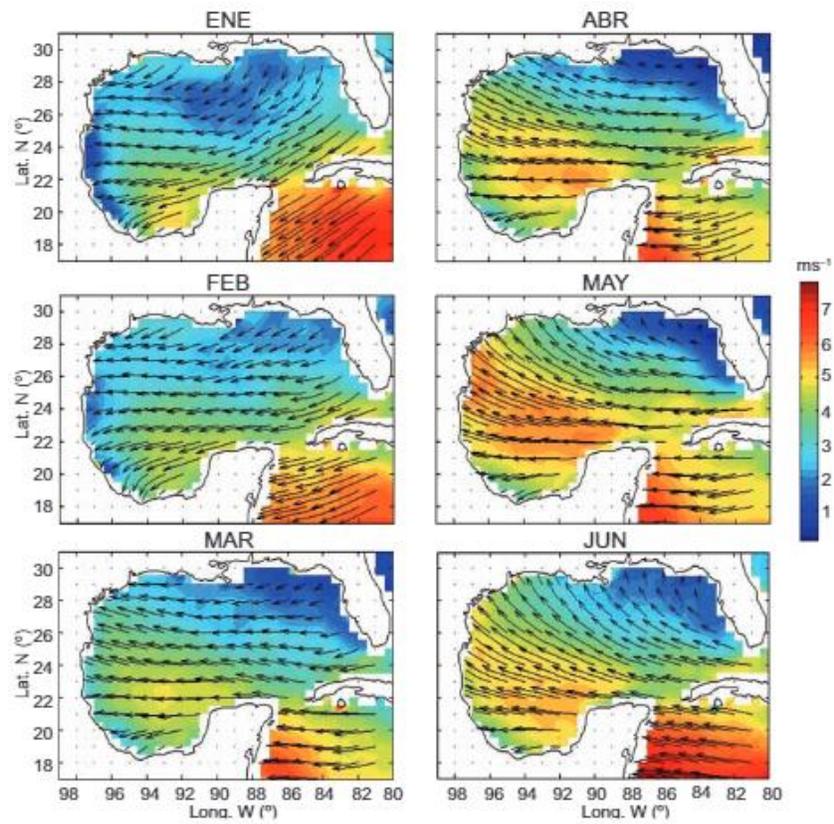


Figura 3.5. Medias mensuales a largo plazo (1999-2006) de los vientos en el Golfo de México basadas en datos de Qscat / SeaWinds. La rapidez del viento se indica en escalas de colores y las flechas indican su dirección. Periodo de enero a junio. Recuperado de Zavala-Hidalgo et al. (2014).

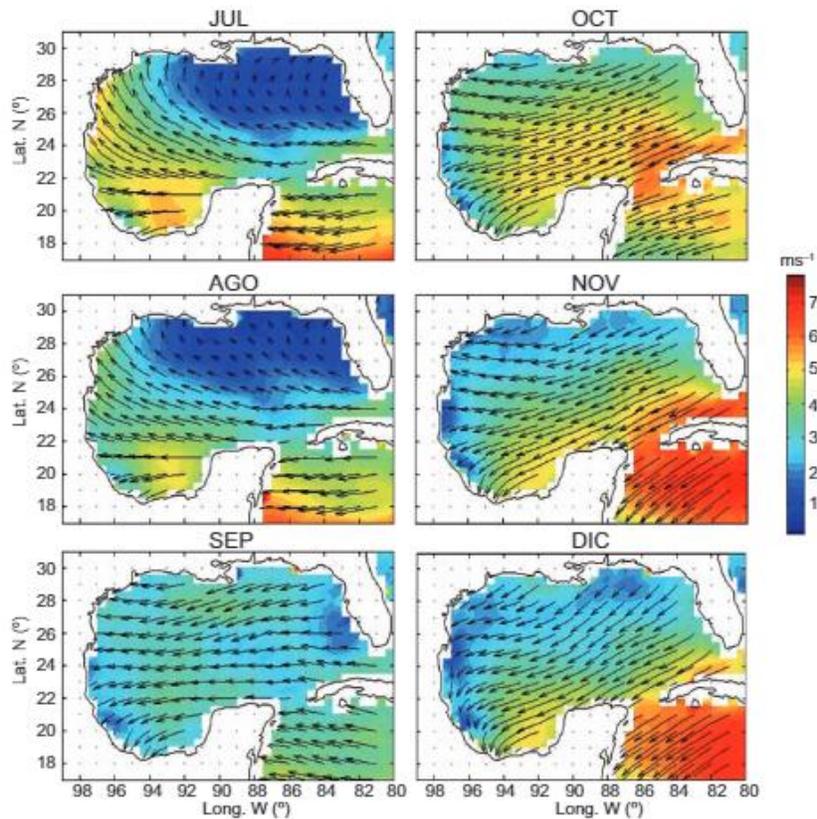


Figura 3.6. (Continuación). Medias mensuales a largo plazo (1999-2006) de los vientos en el Golfo de México. Periodo de julio a diciembre. Recuperado de Zavala-Hidalgo et al. (2014).

Zavala-Hidalgo et al. (2014) mencionan que la estacionalidad del forzamiento del esfuerzo del viento invierte las corrientes de la plataforma interna a lo largo del año, es decir, la variabilidad interanual de la circulación en las plataformas está asociada con la variabilidad interanual de la circulación atmosférica.

La circulación en las plataformas del Golfo de México, en especial en la plataforma interna del occidente, tiene un forzamiento dominante el cual es la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa (por ejemplo, Cochrane y Kelly, 1986; Cho et al., 1998; Zavala-Hidalgo et al., 2003; Nowlin et al., 2005; Dubranna et al., 2011). Esta componente, como explica Zavala-Hidalgo et al. (2003), domina cuando la escala de tiempo de interés es mayor que el periodo inercial, cuando las escalas de las corrientes a lo largo de la plataforma y el campo de viento son mayores que el ancho de la plataforma, y cuando el número de Rossby es pequeño, es decir, los términos de aceleración horizontal son relativamente pequeños en comparación con aquellos asociados a la fuerza de Coriolis. La componente a lo largo de la costa puede converger debido a la forma cóncava del

Golfo occidental, lo que genera confluencias de las corrientes y, por tanto, transportes costeros transversales. Las regiones de confluencia en el Golfo de México son dos: una se encuentra en el noroeste (alrededor de los 26.5°N) y se observa de abril a agosto, y la otra se ubica en la parte más al sur de la Bahía de Campeche (entre 93°W y 95.5°W), observándose entre septiembre y marzo (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

Los patrones de circulación no son los mismos en toda la zona de plataforma del Golfo de México, sino que se puede agrupar en distintas regiones, que son las cuatro principales plataformas en las que se ha dividido el Golfo, como se ve en la Figura 3.7: plataforma del oeste de Florida (WFS por sus siglas en inglés *West Florida Shelf*), la plataforma Texas-Luisiana (LATEX), la plataforma Tamaulipas-Veracruz (TAVE), y el Banco de Campeche (BC).

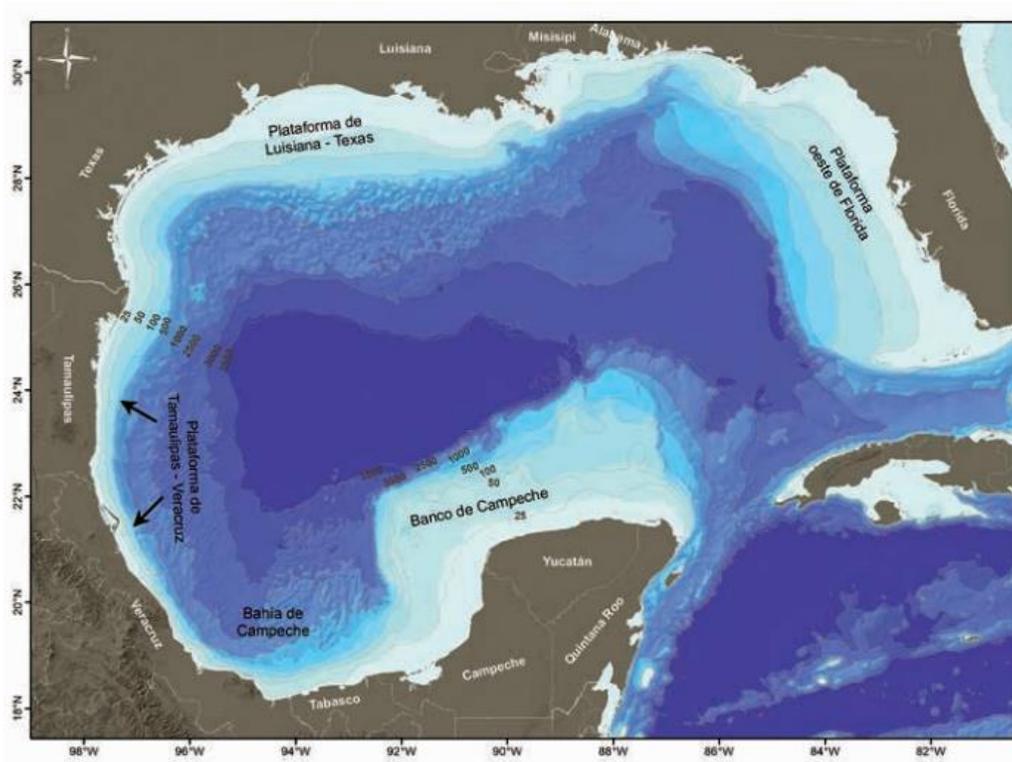


Figura 3.7. Mapa del Golfo de México. Se muestran los estados costeros y las plataformas continentales. Se indican las isobatas de 25, 50, 100, 500, 1,000, 2,500, 3,000 y 3,500 m. Recuperado de Romero-Centeno et al. (2021).

Cada plataforma continental se distingue por su comportamiento a lo largo del ciclo anual. A continuación, se presentan los patrones de circulación de cada plataforma continental, que esquemáticamente se resumen en la Figura 3.8.

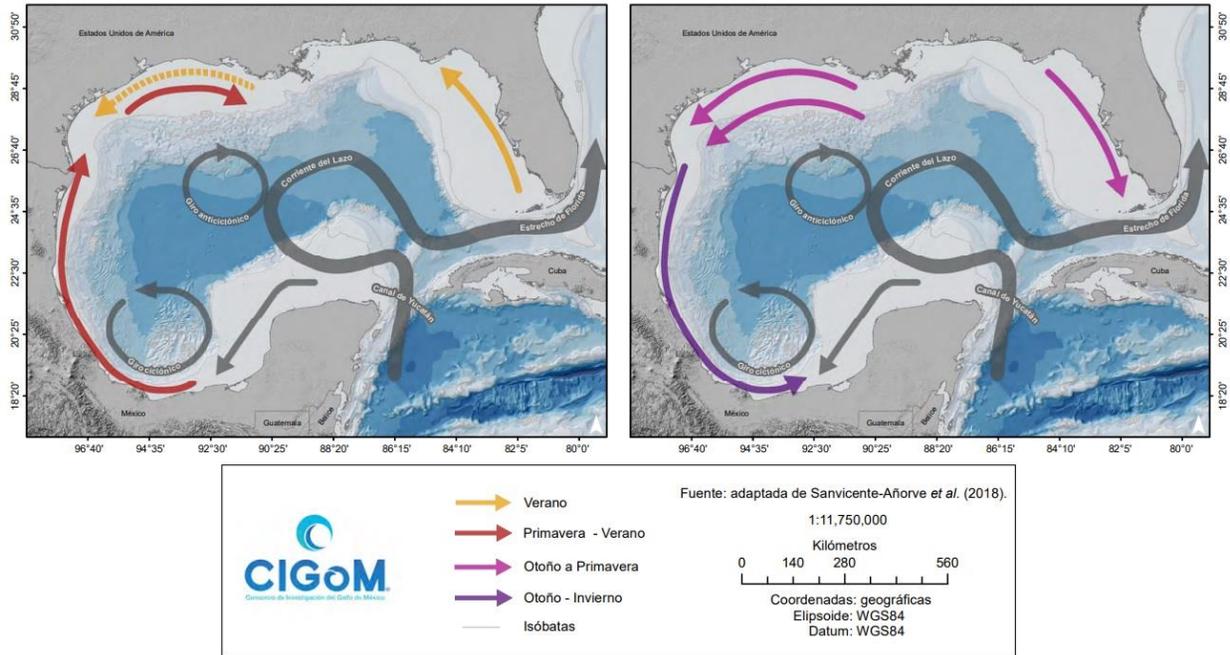


Figura 3.8. Principales corrientes superficiales en el Golfo de México. Recuperado de Peters et al. (2021).

3.2.1. WFS

La plataforma del oeste de Florida es una plataforma continental amplia y compleja, delimitada al sur por la región de *Florida Keys* hasta *Dry Tortugas* (ver Figura 3.9). Esta plataforma contiene tanto regiones de isóbatas anchas de pendiente suave, como de isóbatas estrechas de pendiente pronunciada. Las isóbatas de la plataforma se curvan hacia el oeste casi 90° sobre la zona de *Big Bend* de Florida y luego convergen a medida que la plataforma se estrecha al noroeste en la costa del Cañón DeSoto (Weisberg y He, 2003; Schmitz et al., 2005; Zavala-Hidalgo et al., 2014).

El forzamiento local en toda la WFS se debe a sistemas meteorológicos estacionales y de escala sinóptica, ciclones tropicales y aportaciones fluviales distribuidas. En el lado occidental, la CL puede interactuar con isóbatas relativamente poco profundas, poniendo en movimiento corrientes persistentes hacia el sur. Los aportes fluviales en esta plataforma son el río Mississippi (principalmente) y aportaciones acumuladas de otros ríos del sureste de los Estados Unidos y de los estuarios de Florida y los Everglades, los cuales varían estacionalmente con caudales máximos en primavera para los ríos que ingresan a la parte norte del dominio, y en verano para los ríos que se originan en Florida (Weisberg y He, 2003).

De acuerdo con Yang y Weisberg (1999), He y Weisberg (2003b), Liu y Weisberg (2005) y Zavala-Hidalgo et al. (2014), la WFS en promedio tiene circulación en la plataforma interna hacia el noroeste en verano con condiciones favorables de *downwelling*, mientras que en otoño-invierno la circulación es hacia el sureste con condiciones favorables de *upwelling*. La circulación de plataforma interna está desacoplada de la circulación de la plataforma media y externa debido a un flujo de retorno originado cuando la región de *Florida Keys* actúa como una barrera del flujo que viaja al sureste y llega a la plataforma interna, y también debido a flujos de mezcla y de calor superficial que son producto de cambios diferenciados de temperatura en las plataformas (la plataforma interna cambia más rápido su temperatura que la plataforma media, con un aumento en primavera y una disminución en otoño).

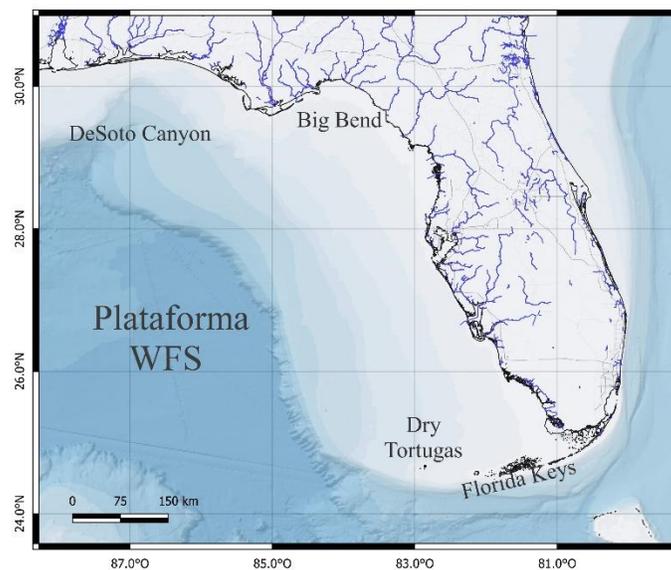


Figura 3.9. Plataforma *West Florida Shelf*. Se muestran las principales zonas de la plataforma, así como los ríos (líneas azules).

3.2.2. LATEX

La circulación en la plataforma de Texas y Luisiana, la cual cuenta con un ancho de 200 km, ha sido detallada en varios estudios (Cochrane y Kelly, 1986; Oey, 1995; Cho et al., 1998; Nowlin et al., 1998; Wang et al., 1998; Zavala-Hidalgo et al., 2003; Jarosz y Murray 2005; Nowlin et al., 2005), los cuales indican que la plataforma interna, donde la profundidad es menor a 50 m,

está dominada por una circulación ciclónica (hacia el oeste o costa abajo¹) impulsada por el viento a lo largo de la mayor parte del año, excepto en los meses de julio y agosto, cuando la corriente se invierte hacia el este (costa arriba²) porque el viento costero lo hace. La variabilidad en la plataforma interna está dominada por la escala de tiempo de 2 a 10 días, consistente con el forzamiento atmosférico a escala sinóptica. Sobre la plataforma externa y el quiebre de la plataforma la circulación es más débil y predominantemente hacia el noreste (circulación ciclónica), siendo más intensa durante verano. La variabilidad de esta plataforma está en la escala de tiempo de mesoescala oceánica (10-100 días), lo que sugiere que el forzamiento principal probablemente está relacionado con los remolinos anticiclónicos de la CL que chocan en el borde de la plataforma (Nowlin et al., 1998; Nowlin et al., 2005).

La plataforma LATEX está influenciada por la descarga de agua dulce y la carga de nutrientes del sistema fluvial Mississippi-Atchafalaya (Figura 3.10). Durante el otoño y el invierno, debido al flujo generalmente ciclónico en la plataforma, el agua fría y de baja salinidad del sistema fluvial es advectada hacia la plataforma TAVE y, en menor proporción, al sur de la Bahía de Campeche. Es en verano cuando la circulación de TAVE se invierte (como se describirá más adelante, en la sección 3.2.3) por lo cual el agua del sistema fluvial no llega a dicha plataforma y permanece recirculando dentro de la plataforma LATEX, o es advectada hacia el este de la desembocadura del río Mississippi (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Schmitz, 2005; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

Para la mayor parte de la plataforma LATEX existe una alta correlación entre la componente de esfuerzo del viento a lo largo de la costa y las corrientes locales, lo que indica que el viento local es el principal mecanismo de forzamiento en la plataforma (Cochrane y Kelly, 1986; Cho et al., 1998; Nowlin et al., 1998; Zavala-Hidalgo et al., 2003 y Morey et al., 2005). Como se mencionó anteriormente, debido a la forma cóncava del Golfo existen zonas donde la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa converge; una de las dos regiones de confluencia se encuentra en la plataforma LATEX, alrededor de los 26.5°N, con vientos favorables de

¹ Costa abajo: con la costa a la derecha del flujo o en sentido de la propagación de ondas Kelvin.

² Costa arriba: con la costa a la izquierda del flujo o en sentido opuesto de la propagación de ondas Kelvin.

convergencia de marzo-abril a agosto, alcanzando su punto máximo en mayo (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

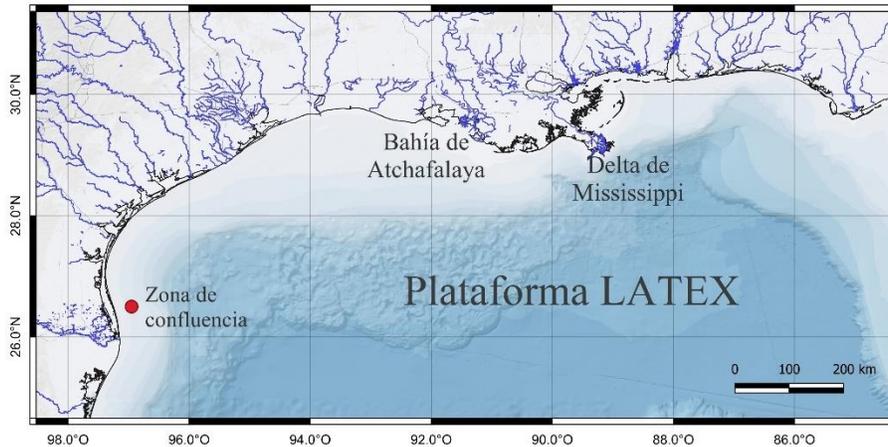


Figura 3.10. Plataforma Texas-Luisiana. Se muestran los ríos (líneas azules) y las principales zonas de descarga de éstos. La zona de confluencia (círculo rojo) fue estimada a partir del estudio de Zavala-Hidalgo et al. (2003).

3.2.3. TAVE

La plataforma Tamaulipas-Veracruz es la más angosta del Golfo de México, variando desde alrededor de 65 km de ancho en el límite entre Tamaulipas y Texas hasta alrededor de 15 km en el sur de Veracruz y 40 km en Tabasco. Por su ancho angosto, la distinción entre la plataforma interna y externa no es tan clara como lo es en la plataforma LATEX, por lo cual se necesitan más observaciones para identificar la coherencia de la circulación entre estas dos (Zavala et al., 2014).

Aunque la plataforma TAVE tiene pocas observaciones en comparación con la de LATEX, se ha mostrado que la circulación es impulsada por el esfuerzo del viento, siendo los patrones los siguientes. Durante septiembre y marzo las corrientes son hacia el sur o en sentido antihorario (costa abajo), mientras que de mayo a agosto las corrientes van al norte o en sentido horario (costa arriba), tiempo durante el cual se experimenta *upwelling* debido al transporte de Ekman. Abril es el mes de transición, es decir, cuando la corriente costera se invierte, lo que favorece los transportes costeros costa afuera en la región de confluencia; este cambio de dirección de las corrientes es una de las características estacionales más importantes de la circulación en las plataformas

continentales del Golfo de México (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Morey et al., 2005; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Dubranna, et al., 2011). Es en la plataforma TAVE donde se encuentran las corrientes costeras más fuertes y variables en la frecuencia estacional, alcanzando una magnitud de $0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Zavala-Hidalgo et al., 2003).

En esta plataforma los principales aportes de agua dulce provienen de los ríos locales, principalmente de los ríos Pánuco, Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva-Usumacinta (Figura 3.11), con máxima descarga mensual en septiembre-octubre (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009). Otro forzamiento importante son los RCL, que tienen una fuerte influencia en la plataforma TAVE dado que éstos se disipan en el quiebre la plataforma (ver sección 3.3).

Al igual que en la plataforma LATEX, se ha mostrado que en TAVE existe una alta correlación entre la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa y las corrientes locales. De hecho, en esta plataforma la componente a lo largo de la costa es la más fuerte y con mayor variabilidad en la escala estacional, lo que resulta en la correlación más alta en comparación con las demás plataformas (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Dubranna, et al., 2011; Allende-Arandía et al., 2016). Esta componente del esfuerzo del viento resulta en ondas atrapadas en la costa en el norte de la plataforma TAVE y que se propagan costa abajo hasta el Banco de Campeche occidental (Dubranna et al., 2011).

De acuerdo con los resultados de Zavala-Hidalgo et al. (2003) y Morey et al. (2005), la corriente costera en la plataforma TAVE durante la primavera-verano llega a la plataforma sur de Texas, donde se encuentra con una corriente costera hacia abajo que favorece los transportes mar adentro; hay que recordar que durante este lapso el agua de la plataforma LATEX no llega a TAVE. En otoño-invierno, la corriente costa abajo llega al sur de la Bahía de Campeche (entre los 93°W y 94°W), donde se encuentra con una corriente opuesta a lo largo de la plataforma generando transportes mar adentro estacionales.

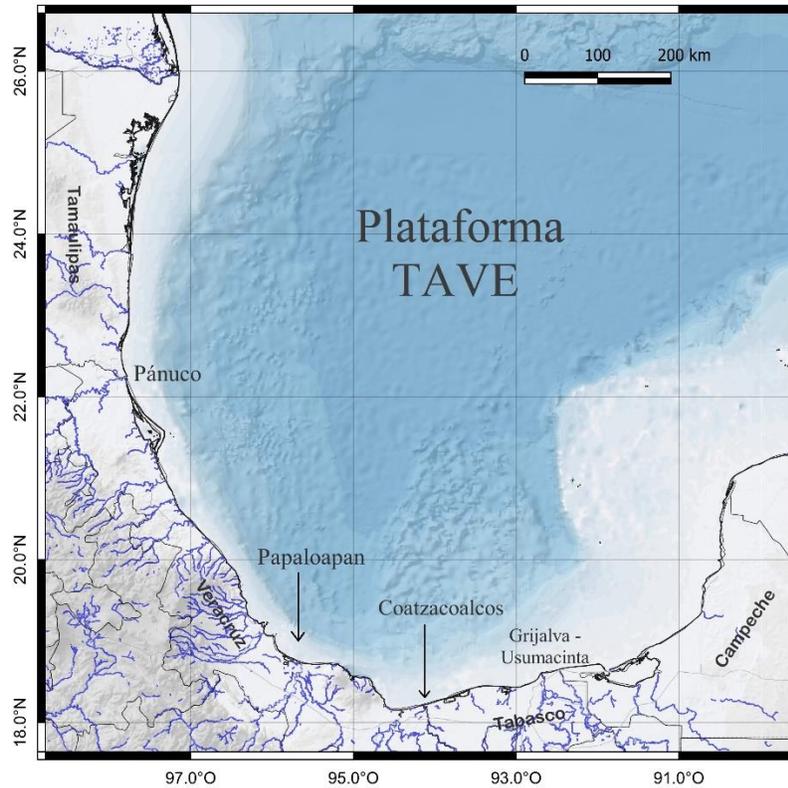


Figura 3.11. Plataforma Tamaulipas-Veracruz. Se muestran los ríos de la plataforma (líneas azules) junto con las principales zonas de descarga de éstos.

3.2.4. BC

El Banco de Campeche incluye la plataforma ancha al norte y la plataforma más estrecha al noroeste de la Península de Yucatán (Figura 3.12). La circulación en la plataforma del BC se puede describir en dos partes. Al norte del estado de Yucatán tiene una circulación predominante hacia el oeste durante todo el año, y en el Banco de Campeche Occidental la circulación de baja frecuencia es hacia el sur a lo largo del año, con un máximo en julio y un mínimo en septiembre, manteniéndose débil hasta marzo (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Zavala-Hidalgo et al., 2014; Peters et al., 2021).

Los resultados de Zavala-Hidalgo et al. (2003) sugieren que para el Banco de Campeche Occidental, al igual que para la plataforma LATEX y TAVE, la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa es el forzamiento principal, la cual es muy estable durante todo el año en sentido horario. Sin embargo, una pequeña región frente a la costa del estado de Campeche muestra

un comportamiento diferente: el esfuerzo del viento en esta región cambia de una dirección en sentido antihorario durante la primavera-verano a una dirección en el sentido horario durante el otoño-invierno (Zavala-Hidalgo et al., 2014).

Durante el otoño-invierno la circulación del BC se adentra en la parte más austral de la Bahía de Campeche, donde se encuentra con una corriente que se mueve en sentido contrario, lo que genera transportes costa afuera. Esta región de fuerte convergencia de la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa (entre los 93°W y 95.5°W) es una de las dos regiones de confluencia que se han identificado, con una ocurrencia de septiembre a febrero-marzo, alcanzando un leve pico en octubre-noviembre (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Morey et al., 2005; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009). Sin embargo, en el estudio de la plataforma externa realizada por Dubranna et al. (2011) se encontró que la circulación en el Banco de Campeche Occidental está condicionada por el esfuerzo del viento remoto más que del local, dado que sus resultados mostraron que las corrientes en septiembre y marzo viajan en dirección opuesta a la dirección en que el viento local sopla y, a su vez, no encontraron una convergencia durante otoño-invierno causado por corrientes opuestas. No obstante, los autores encontraron una convergencia del flujo medio en la plataforma sur durante las inversiones de los vientos en septiembre y octubre, causado por diferencias en la intensidad más que por la dirección de las corrientes medias.

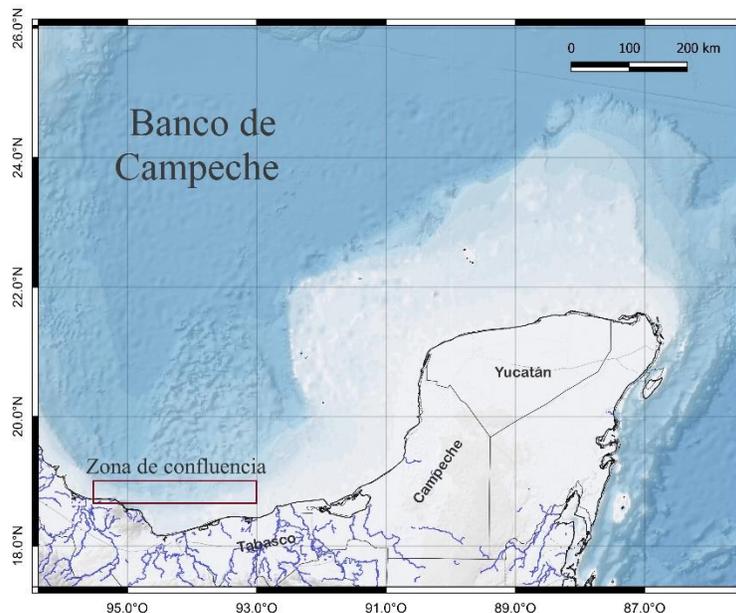


Figura 3.12. Banco de Campeche. Se muestran los ríos de la plataforma (líneas azules), así como la zona de confluencia (cuadro rojo), la cual fue estimada a partir del estudio de Zavala-Hidalgo et al. (2003).

3.3. Interacción SCL - plataformas continentales

Si bien las plataformas internas del Golfo de México están fuertemente influenciadas por el esfuerzo del viento, como se describió en la sección anterior, para las plataformas externas se ha encontrado que el SCL puede tener una contribución importante a través de su interacción con el quiebre de las plataformas. Los RCL influyen en la circulación de las plataformas forzando directamente el movimiento, estableciendo gradientes del nivel del mar y contribuyendo con energía a la circulación, a su vez que proporcionan un mecanismo eficiente para el transporte e intercambio de agua en la plataforma, y flujos a través de la costa (Biggs y Müller-Karger, 1994; Oey, 1995; Ohlmann et al., 2001; He y Weisberg, 2003a; Zavala-Hidalgo et al., 2003; Biggs et al., 2005; Hamilton y Lee, 2005; Schmitz et al., 2005; Weisberg et al., 2005; Dubranna et al., 2011).

Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) encontraron que la interacción de los RCL con la plataforma externa y el talud continental es uno de los dos mecanismos principales para generar transportes costeros transversales, siendo la confluencia de corrientes a lo largo de la plataforma el otro. El primer mecanismo se ha reportado sobre todo al oeste de *Dry Tortugas* en la WFS (Weisberg y He, 2003 y Weisberg et al., 2005) y en el noroeste del Golfo occidental (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Dubranna et al., 2011).

Zavala-Hidalgo et al. (2003) sugieren que los RCL tienen más influencia en la región occidental del Golfo cuando la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa es muy débil, pero esta última sigue siendo el principal forzamiento de la circulación. Sin embargo, los resultados de Dubranna et al. (2011) indican menor correlación entre el esfuerzo del viento costero y las corrientes costeras, por lo cual dan menos peso a la circulación impulsada por el viento y más peso al forzamiento por los remolinos de pendientes. Por ello, así como mencionan Ohlmann et al. (2001), la contribución que tienen los RCL en la circulación de las plataformas debe considerarse junto con el esfuerzo del viento.

Capítulo 4

Metodología

En este trabajo se busca estudiar dos aspectos de la circulación superficial del Golfo de México: el primero es analizar el SCL mediante las métricas de la CL y de los RCL, en tanto el segundo es encontrar las frecuencias significativas de las corrientes en las plataformas del Golfo a través de la estimación del espectro utilizando el periodograma y los espectros rotatorios.

Para ambos estudios se utilizó la base de datos del producto CMEMS de Zona Global y tiempo rezagado (DT) con identificador de producto *SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047*, anteriormente distribuida por AVISO+ (ver <https://duacs.cls.fr/faq/2017-aviso-cmems-correspondance/>). Este producto procesa datos de todas las misiones de los altímetros Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral / AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T / P, ENVISAT, GFO y ERS1 / 2, mediante el sistema de procesamiento de datos de altímetro multimisión DUACS. En primera instancia, el sistema utiliza las misiones de altímetro a lo largo de la trayectoria de los productos llamados *SEALEVEL*PHY_L3_REP_OBSERVATIONS_008**, para después realizar una interpolación óptima fusionando todos los satélites y así calcular SLA respecto a una media de veinte años de 2012 [1993, 2000] y ADT en malla. A partir de estas dos variables se derivan las velocidades geostróficas absolutas (UGOS para la componente zonal y VGOS para la componente meridional) así como sus respectivas anomalías (UGOSA y VGOSA).

El producto CMEMS cuenta con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (al igual que los demás productos globales en malla DUACS), una resolución temporal instantánea diaria y de media mensual, una cobertura vertical de un solo nivel (superficial) y una cobertura temporal desde

01-01-1993 hasta 03-06-2020 (la cobertura temporal va actualizándose irregularmente) al momento de descargar los datos. En el apéndice A se encuentra mayor información del producto.

Para fines de este trabajo, las variables que se descargaron fueron ADT (*sea_surface_height_above_geoid*), UGOS (*surface_geostrophic_eastward_sea_water_velocity*) y VGOS (*surface_geostrophic_northward_sea_water_velocity*) para el lapso de toda la cobertura temporal, con resolución temporal diaria y un área que abarca el Golfo de México. Considerando que las variables UGOS y VGOS designan las velocidades geostróficas, se reescribirán como u y v .

A continuación se describen las dos metodologías llevadas a cabo, una para cada aspecto de los estudios realizados en este trabajo.

4.1. Análisis del Sistema de la Corriente del Lazo

Para llevar a cabo este estudio, primero se eligió una técnica de seguimiento del SCL y posteriormente se calcularon las métricas de la CL y las de sus remolinos. Para el rastreo continuo del SCL se recurrió a la altimetría satelital, con la cual se puede definir un contorno de la altura de la superficie del mar que sirva como proxy o indicador de SCL.

Hamilton et al. (2000) seleccionaron el contorno de altura del mar de 17 cm, ya que éste coincide estrechamente con la ubicación de los gradientes máximos en la topografía y permite el seguimiento continuo de los remolinos durante su traslación a través del oeste del Golfo de México. También, el contorno de 17 cm de la topografía dinámica total funciona como una definición del núcleo de alta velocidad de la CL en el este del Golfo de México. Esta técnica se ha utilizado por varios autores (por ejemplo, Leben, 2005; Hall y Leben, 2016), quienes utilizan el contorno de 17 cm a partir de una SSH sintética. Sin embargo, para fines de este trabajo de tesis, la metodología consiste en utilizar un contorno de ADT que cumpla la función principal, es decir, que rastree de manera acertada el contorno de la CL y sus remolinos.

Como primer paso se comprobó que el contorno de ADT a escoger coincidiera con la ubicación de los gradientes máximos en la topografía. El cálculo del gradiente bidimensional de la topografía en cada paso temporal n es dado por:

$$\nabla(ADT_n) = \left(\frac{\partial(ADT_n)}{\partial x}, \frac{\partial(ADT_n)}{\partial y} \right) \quad (4.1)$$

siendo ∂x y ∂y el espaciamento de la longitud y de la latitud, respectivamente, los cuales tienen valores constantes ($1/4^\circ$) dada la malla de los productos CMEMS.

El cálculo de la ecuación 4.1 se realizó mediante el método de Euler hacia adelante, para posteriormente obtener su módulo y así comparar las isolíneas del resultado contra el contorno dinámico de 17 cm. En la Figura 4.1 se presentan los valores de ADT en la región del Golfo en el día 08 de julio del 2013 (para ejemplificar), junto con las isolíneas del módulo del gradiente topográfico; los valores blancos en la escala de colores representan el valor de ADT de 17 cm. De esta manera se puede apreciar que el contorno de 17 cm corresponde de manera cercana con el máximo gradiente de topografía, por lo cual también se puede utilizar como proxy para la definición del SCL.

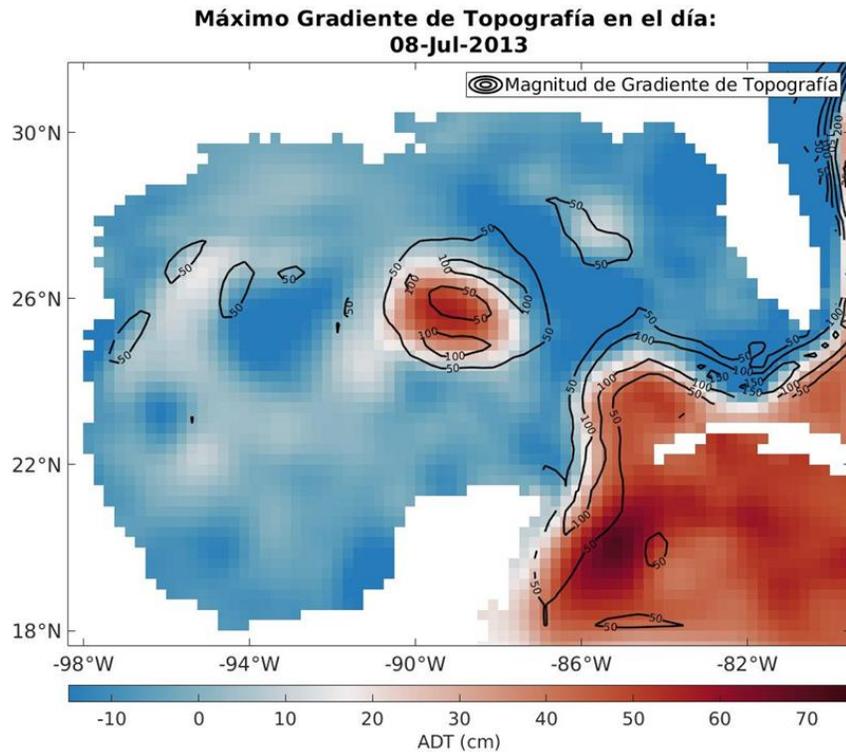


Figura 4.1. Ejemplo del día 08 de julio del 2013 de los valores de ADT (quitándole la media espacial) y las isolíneas (líneas negras) del módulo del gradiente de topografía [$\text{cm}/^\circ$]. El color blanco en la barra de colores indica el valor de 17 cm de ADT.

Habiendo escogido el contorno que rastree al SCL, se limitó la región donde se ubica la CL, que fue $[92.0^{\circ}\text{W}, 81.0^{\circ}\text{W}] \times [21.7^{\circ}\text{N}, 31.0^{\circ}\text{N}]$, eliminando la región al sur de Cuba y al este de Florida, la cual serviría para calcular la media espacial de ADT. A los valores de ADT originales se les restó la media espacial, restringiendo de esta manera la región donde analizar a la CL. Entonces, se procedió a encontrar todos los contornos de ADT-17 cm con las especificaciones mencionadas. Para saber qué contorno correspondía a la CL y no a los remolinos, se escogió el que estuviera más cercano a la máxima longitud y mínima latitud de la región a analizar, es decir, el que se encontrara al suroeste. Existieron ocasiones en que el contorno de la CL no fue continuo, sino que se llegó a cortar en varios tramos en el norte de Cuba; cuando esto sucedía, se tuvo que encontrar cada tramo del contorno correspondiente a la CL y ponerlos como uno solo, así como se representa en la Figura 4.2.

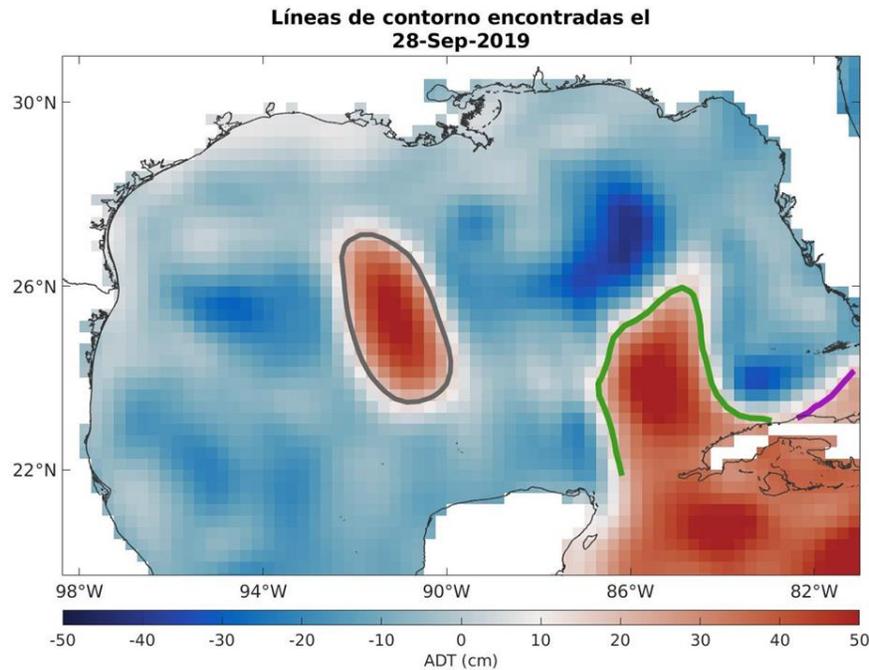


Figura 4.2. Ejemplo de contornos de ADT-17 cm encontrados en el día 28 de septiembre del 2019. El contorno gris corresponde a un Remolino de la Corriente del Lazo y los contornos verde y morado representan la Corriente del Lazo.

Los contornos para el rastreo del SCL se registraron cada paso temporal y a partir de éstos se derivaron las métricas que se describirán a continuación, las cuales, como indican Dukhovskoy et al. (2015), se utilizan para cuantificar las características estadísticas de la CL y de los RCL.

4.1.1. Métricas de la Corriente del Lazo

De acuerdo con Hamilton et al. (2000) y Leben (2005), las métricas de la CL calculadas a partir del contorno que define al SCL tienen la función de describir la intrusión de ésta y la separación de los RCL. Estas métricas (ver Figura 4.3 para mayor entendimiento) se pueden representar como series de tiempo y también con sus distribuciones, e incluyen:

1. La máxima penetración al norte de la CL, calculada como la máxima latitud norte del contorno de la corriente.
2. La máxima penetración al oeste de la CL, calculada como la máxima longitud oeste del contorno de la corriente.
3. La extensión de la CL, calculada como el perímetro del contorno de la corriente, es decir, el módulo de las diferencias o espaciamentos entre las coordenadas del contorno:

$$Extensión_{CL} = \sqrt{dx_{CL}^2 + dy_{CL}^2} \quad (4.2)$$

4. El área de la CL, calculada como el área del polígono especificado por el contorno de la corriente y las rectas que unen los puntos $p_1(84.125^\circ\text{W}, 21.875^\circ\text{N})$, $p_2(84.125^\circ\text{W}, 22.375^\circ\text{N})$ y $p_3(81.125^\circ\text{W}, 23.125^\circ\text{N})$.
5. La circulación de la CL, calculada como la integral de línea de la velocidad geostrófica a lo largo del contorno de la corriente, es decir:

$$\int \vec{V} \cdot \vec{ds} = \int u dx + \int v dy \quad (4.3)$$

donde u y v son las componentes zonal y meridional de la velocidad, respectivamente; y dx y dy son los espaciamentos de las coordenadas en ambas direcciones. La integral fue calculada mediante el método de trapecios.

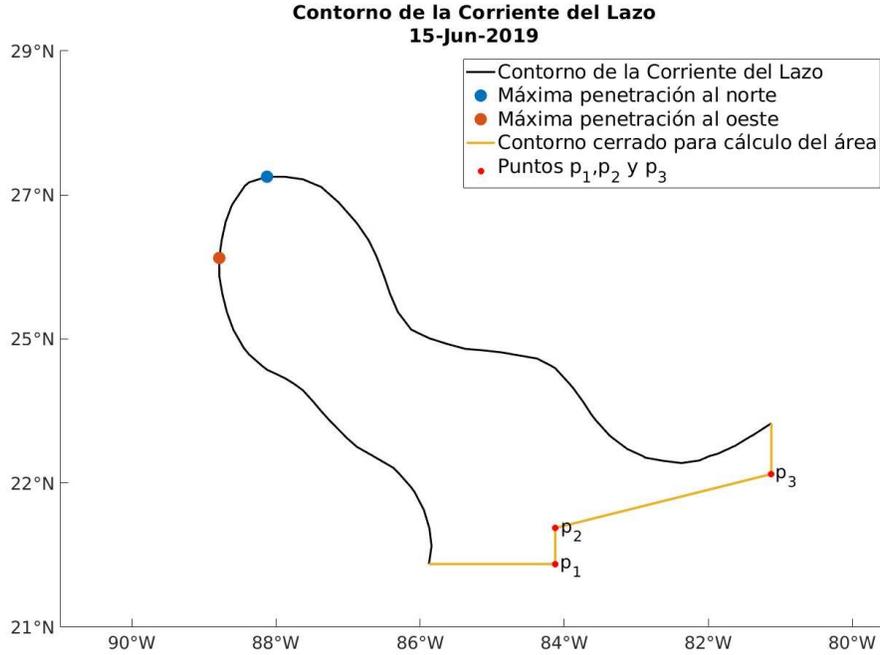


Figura 4.3. Ejemplo del contorno de la Corriente del Lazo en el día 15 de junio del 2019. Se muestra el valor de la métrica de máxima penetración al norte (punto azul) y al oeste (punto rojizo) de la corriente. La métrica de extensión y circulación se calcula con el contorno de la corriente (línea negra) en tanto la métrica del área se calcula con el polígono especificado por el contorno de la corriente y las rectas (líneas naranjas) que unen los puntos p_1 , p_2 y p_3 (puntos rojos).

En el caso de las últimas tres métricas (extensión, área y circulación), para tratar con unidades de kilómetros en lugar de grados, se optó por utilizar factores de conversión (ecuación 4.5 y 4.6).

Con

$$\theta = \frac{(\text{latitud}^\circ)(\pi)}{180^\circ} \quad (4.4)$$

Se obtienen los factores de conversión (de acuerdo con McNish, 2018):

$$\text{longitud}[\text{km}] = 111.41288(\cos\theta) - 0.09350(\cos^3\theta) + 0.00012(\cos^5\theta) \quad (4.5)$$

$$\text{latitud} [\text{km}] = 111.13295 - 0.55982(\cos^2\theta) + 0.00117(\cos^4\theta) \quad (4.6)$$

Los dos factores de conversión se calcularon para la región del Golfo de México y se obtuvo la media de ambas, dando como resultado 1° longitud=100.5509 km y 1° latitud= 110.7790 km.

4.1.2. Métricas de los Remolinos de la Corriente del Lazo

Los eventos de separación de los RCL se identifican viendo los mapas de ADT por cada paso temporal. Estos eventos de separación, así como mencionan Sturges y Leben (2000), no son eventos rápidos y simples, sino largos y prolongados que duran hasta varios meses. A menudo un remolino que se *desprende* de la CL se vuelve a conectar a ésta después de un mes o más, por lo cual para poder decir con certeza si un remolino se *separa* es necesario observarlo desde que se desprende y mientras continúa formándose y desplazándose hacia el oeste como una característica separada. Leben (2005) define el evento de separación como el desprendimiento final de un remolino de la CL sin que se vuelva a unir a ésta posteriormente. Debido a esto, identificar los eventos de separación de los remolinos no puede automatizarse por completo, sino que requiere una discriminación manual.

Complementariamente, para identificar los eventos de separación de remolinos también se recurrió a observar las series de tiempo de las métricas de la CL, con la finalidad de examinar si en el evento registrado existía un cambio abrupto en el comportamiento de dichas métricas. Esto es porque, cuando un remolino se desprende, se generan cambios en el flujo principal, producto de su propio dinamismo; en las métricas de la CL esto se refleja como un cambio en la latitud y longitud (porque la corriente se retrae), y cambios en la extensión, área y circulación de la misma (porque la corriente cambia su forma y tamaño al arrojar un remolino).

Las métricas de los RCL son:

1. Estacionalidad de separación de los remolinos. Mes en que se desprenden los remolinos.
2. Periodo de separación de los remolinos. Lapso que transcurre entre un evento de separación y otro.
3. Diámetro de los remolinos. Diámetro en km de un remolino al momento de la separación, suponiéndose que es un círculo y bajo la premisa de que su circunferencia es igual al cambio en la extensión de la CL el día que se desprendió con respecto al día anterior. Si el RCL se separó en un tiempo n , su diámetro se calcula como:

$$Diámetro_n = \frac{(Extensión_{CL}(n-1) - Extensión_{CL}(n))}{\pi} \quad (4.7)$$

A las métricas de los RCL se les obtuvieron sus distribuciones y se realizó una base de datos, asignándole a cada remolino su nombre industrial de acuerdo con la página <https://www.horizonmarine.com/loop-current-eddies>.

Adicionalmente, se obtuvo la latitud de retraimiento, la cual es, de acuerdo con Hall y Leben (2016), la máxima latitud de la CL inmediatamente después de la separación de un remolino. El objetivo de este paso fue verificar el indicador de pronóstico estadístico propuesto por Leben (2005), el cual relaciona los periodos de separación de los RCL y la latitud de retraimiento de la CL.

4.2. Análisis de la circulación en las plataformas

El segundo estudio, referente a la circulación superficial de las plataformas continentales del Golfo de México, se llevó a cabo mediante un análisis espectral de la velocidad en diferentes puntos ubicados a lo largo de las isóbatas de los 50 m y 200 m, utilizando las metodologías del periodograma y los espectros rotatorios. Las coordenadas de las isóbatas fueron proporcionadas por el grupo de IOA-ICAyCC de la UNAM, las cuales tuvieron un filtrado de Hamming. Puesto que los productos CMEMS tienen un margen de error más alto en las zonas costeras que en el resto de su dominio, no se utilizaron isóbatas de menor profundidad.

4.2.1. Selección y preprocesamiento de datos

Los puntos para analizar los espectros fueron escogidos con el fin de abarcar toda la región de las plataformas en el Golfo de México y así tener un panorama completo de la variabilidad de las corrientes superficiales que refleje los distintos procesos dinámicos subyacentes, como se observa en la Figura 3.8. En total se seleccionaron 18 puntos: 8 ubicados en la isóbata de los 50 m y 10 en la isóbata de los 200 m (ver Figura 4.4). Los valores de las velocidades geostroficadas se interpolaron a las isóbatas para asegurar que los puntos escogidos tuvieran las variables asociadas.

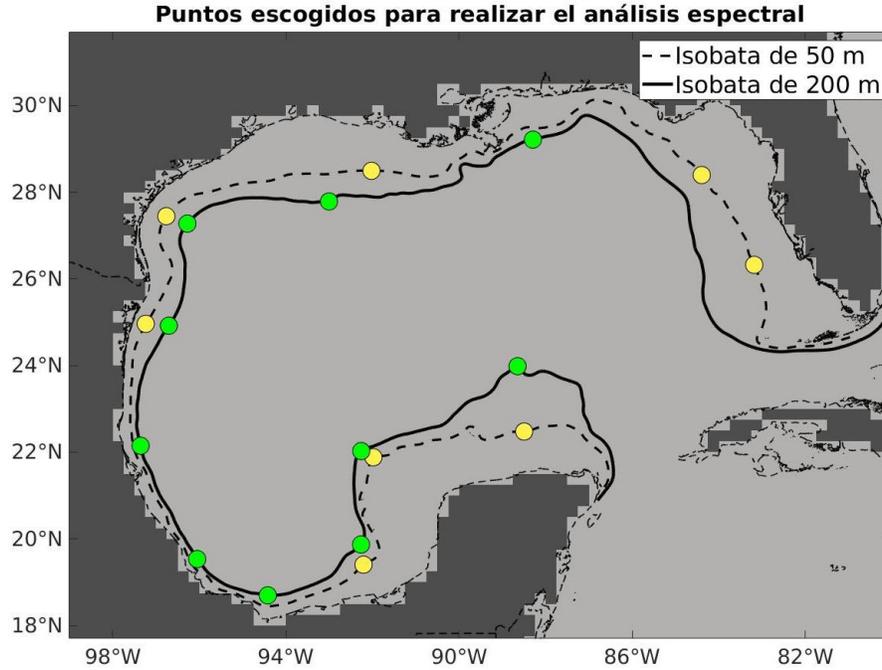


Figura 4.4. Puntos escogidos para realizar el análisis espectral. Se seleccionaron 8 puntos a lo largo de la isóbata de los 50 m (círculos amarillos) y 10 a lo largo de la isóbata de los 200 m (círculos verdes).

Por cada punto las velocidades geostroficadas se descompusieron en una componente paralela y una perpendicular a la isóbata, creando así un sistema coordenado rotado. El propósito de crear este sistema es observar la cantidad de energía que éstos representan; es decir, dependiendo del punto seleccionado, saber qué componente contribuye más a la velocidad total en el océano, si la que se encuentra a lo largo de la isóbata (paralela) o la que la atraviesa (perpendicular). Se espera que la componente paralela sea la predominante de acuerdo con lo descrito en la sección 3.2.

Para la creación del sistema rotado primero se constituyó un vector unitario representativo de la isóbata utilizando las coordenadas de un punto anterior y uno posterior al punto en cuestión (Figura 4.5); este vector representativo se define con agua somera a la derecha. Seguidamente, se procedió a obtener la componente paralela y la componente perpendicular de la velocidad mediante una matriz de rotación. Teniendo en cuenta el diagrama de la Figura 4.6, se puede crear un nuevo sistema coordenado rotado (*paralelo, perpendicular*) a partir del vector representativo de la isóbata $\vec{l} = (l_x, l_y)$, el cual está rotado en un ángulo θ con respecto al sistema cartesiano (x, y) , en el que se encuentran las componentes de la velocidad zonal y meridional.

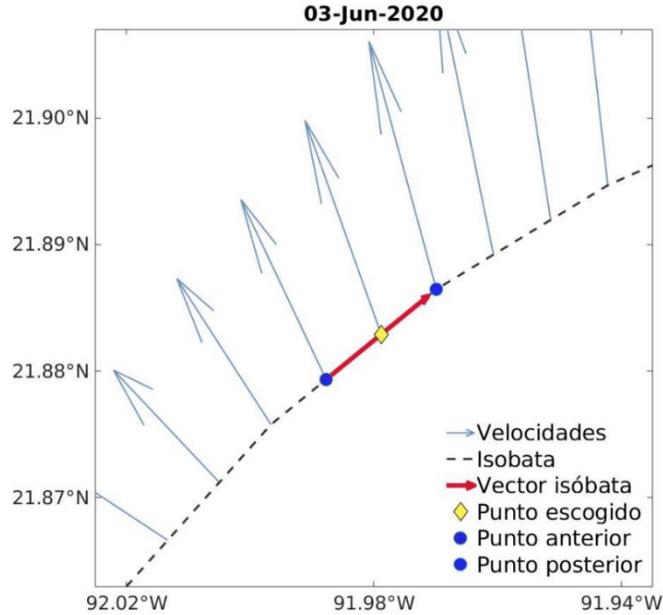


Figura 4.5. Ejemplificación del procedimiento de la descomposición de vectores, día 03 de junio del 2020. Si se quiere descomponer el vector velocidad (flechas azules) del punto elegido (rombo amarillo) en componentes paralela y perpendicular a la isóbata en cuestión (línea discontinua negra) se necesita trazar un vector representativo de la isóbata (flecha roja), el cual se constituye con un punto anterior y un punto posterior (puntos azules) al que se escogió. Esto se realiza para cada punto seleccionado.

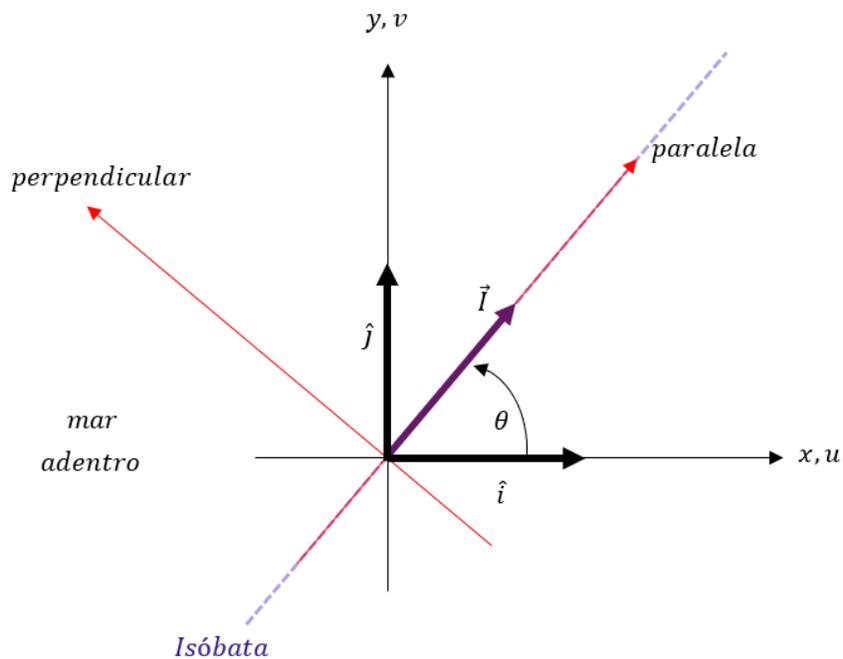


Figura 4.6. Diagrama que representa las componentes de velocidad paralela y perpendicular al vector representativo de la isóbata \vec{I} . La rotación considera un ángulo positivo θ (en sentido antihorario) desde el sistema cartesiano (x, y) , en el cual se define el vector velocidad (u, v) . Nótese que la componente perpendicular de la velocidad está dirigida hacia mar adentro.

Para conocer el valor del ángulo entre los dos sistemas se tiene que el producto escalar del vector de la isóbata y del vector unitario de \hat{i} es:

$$\vec{I} \cdot \hat{i} = \|\vec{I}\| \|\hat{i}\| \cos \theta \quad (4.8)$$

entonces,

$$\cos \theta = \frac{\vec{I} \cdot \hat{i}}{\|\vec{I}\|} \quad (4.9)$$

por lo que,

$$\theta = \cos^{-1} \frac{I_x}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2}} \quad (4.10)$$

Conociendo θ , y utilizando la matriz de rotación (de acuerdo con el diagrama de la Figura 4.6),

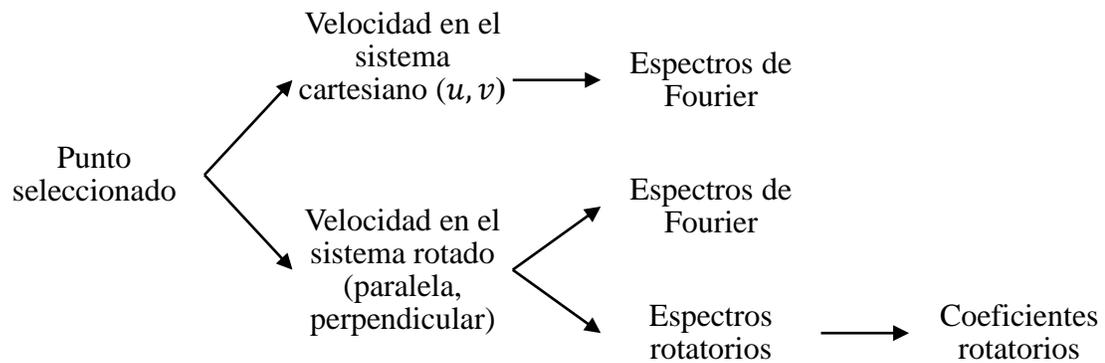
$$\begin{pmatrix} \textit{paralela} \\ \textit{perpendicular} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

se puede obtener el cálculo de las componentes paralela y perpendicular:

$$\textit{paralela} = u \cos \theta + v \sin \theta \quad (4.12)$$

$$\textit{perpendicular} = -u \sin \theta + v \cos \theta \quad (4.13)$$

Posteriormente de la creación de este sistema coordenado, se pudo llevar a cabo el análisis espectral, el cual consistió en calcular los espectros de Fourier para ambos sistemas (el original y el rotado), junto con los espectros rotatorios para el nuevo sistema coordenado, como se resume en el siguiente diagrama. Para este último, se calcularon los coeficientes rotatorios por cada banda de frecuencia de interés.



A continuación se describen las metodologías para la estimación de los espectros.

4.2.2. Espectros de Fourier

A partir de lo descrito en la subsección anterior, se tienen cuatro series de tiempo de las componentes del campo de velocidad: zonal, meridional, paralela y perpendicular. Estas series fueron sujetas a un análisis de Fourier, obteniendo sus espectros con el método del periodograma.

Una breve descripción de este método, resumiendo a Carrillo (2003), Thomson y Emery (2014) y Langton y Levin (2016), consiste en considerar una señal en el tiempo como la suma de varias ondas o componentes armónicas, las cuales tienen su propia amplitud y frecuencia discreta, así como se representa en la Figura 4.7. La señal original la vemos en el dominio del tiempo, mientras que sus componentes se verían en una vista lateral, en el dominio de la frecuencia; esta vista es el espectro de la señal, la cual es una forma de cuantificar las frecuencias de los componentes.

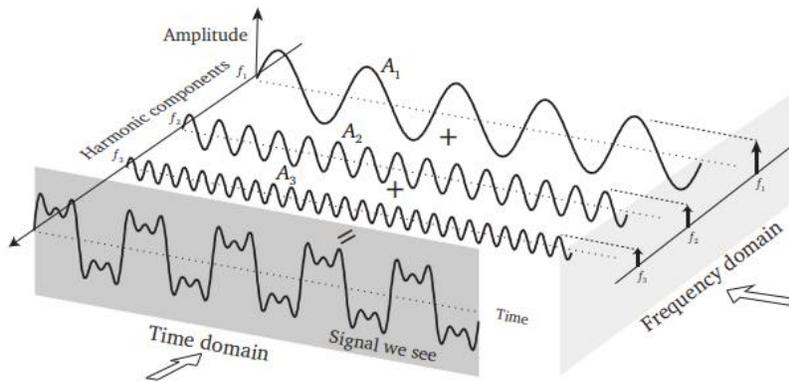


Figura 4.7. Una onda en el dominio del tiempo compuesta de la suma de tres ondas de amplitudes A_1 , A_2 , A_3 y frecuencias f_1 , f_2 y f_3 , respectivamente. Cada componente se puede observar en el Dominio de la Frecuencia, lo que se le conoce como espectro. Recuperado de Langton y Levin (2016).

Por ello, se busca transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia a través de la Transformada de Fourier. Si se trata de una función periódica, la transformada se simplifica con la ecuación descrita por las series de Fourier; en cambio, si se habla de una señal discreta (con un número finito de valores) se utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés *Discrete Fourier Transform*), cuyo cálculo viene dado por

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (4.14)$$

donde y_n es una señal discreta muestreada N veces, siendo n sus elementos, i es la unidad imaginaria y k se refiere a los armónicos.

El algoritmo que requiere menor esfuerzo computacional para calcular la DFT es la Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés *Fast Fourier Transform*), la cual es bastante utilizada para resolver problemas de interferencia, comunicaciones, teoría de la probabilidad, criptografía, acústica, óptica, sistemas de control y muchos más.

Thomson y Emery (2014) explican detalladamente el método del periodograma, el cual es el más utilizado para estimar los espectros de variables oceánicas. Una vez determinadas las componentes de Fourier de una serie de tiempo discreta (ecuación 4.14), éstas se pueden utilizar para estimar la densidad espectral de potencia (DEP) de una señal, es decir, obtener el periodograma. La estimación espectral para la frecuencia f se obtiene a partir de:

$$S_{yy}(f_k) = \frac{1}{N\Delta t} [Y^\dagger(f_k) Y(f_k)] = \frac{1}{N\Delta t} |Y(f_k)|^2, \quad -f_N < f < f_N \quad (4.15)$$

donde \dagger representa el operador complejo conjugado y $f_N = 1 / 2\Delta t \equiv$ frecuencia de Nyquist, la frecuencia más alta que se puede extraer de una serie de tiempo.

Para evitar efectos finales como el fenómeno de Gibbs, la serie de tiempo original se puede rellenar con ceros en un proceso llamado *zero-padding*, después de que se haya eliminado la media de la serie. Este proceso también aumenta la resolución del periodograma y con ello se puede localizar la frecuencia de un pico espectral con mayor precisión. De igual manera, *zero-padding* es útil para poder extender el número de muestras a una potencia entera de 2 para el análisis de FFT.

Si se quiere conocer la potencia total (PT) de la señal, se calcula la integral de la DEP a lo largo de f :

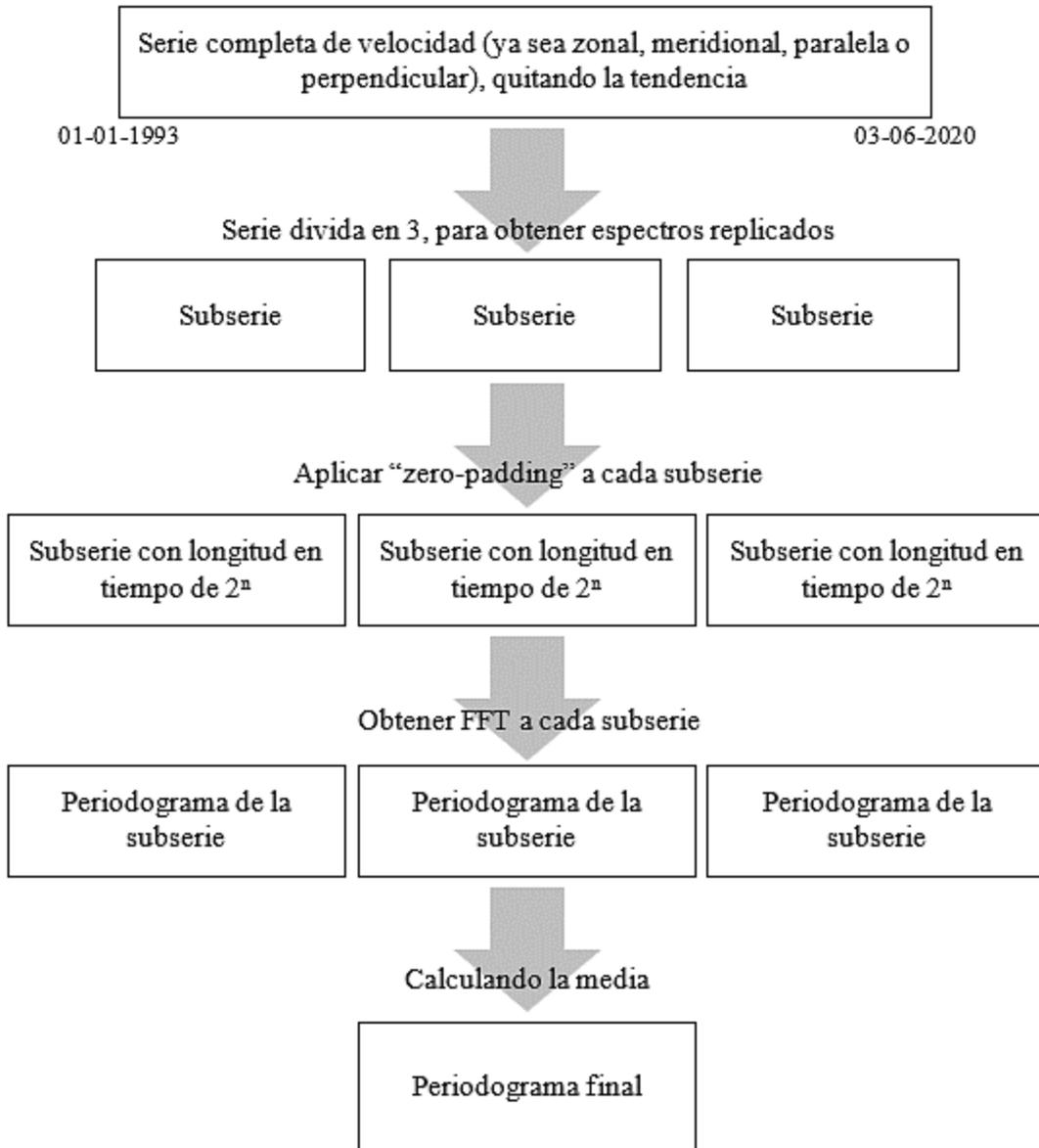
$$PT(S_{yy}) = \int S_{yy}(f_k) df \quad (4.16)$$

4.2.2.1. Procesamiento de las señales

La estimación de los espectros se llevó a cabo, en primera instancia, utilizando la técnica de los espectros replicados, la cual se refiere a obtener espectros para subconjuntos de datos de la serie total, y seguidamente promediarlos. La principal ventaja de llevar a cabo esta técnica es acen-tuar las frecuencias que sobresalen en todos los espectros replicados, y disminuir o eliminar fre-cuencias que no aparecen en todos los espectros.

El número de espectros replicados considerados para este estudio fue de tres, es decir, cada serie de tiempo original (que abarcaban ~ 27 años) se dividió en tres partes enteras iguales para tener una longitud de tiempo de aproximadamente nueve años. Luego, cada subserie se rellenó con ceros (*zero-padding*) para que todas tuvieran una longitud de la siguiente potencia más alta de dos (2^n).

A cada subserie se les calcularon los espectros para finalmente promediarlos, obteniendo un espectro de Fourier final. Estos procedimientos se resumen a continuación:



4.2.3. Espectros rotatorios

Siguiendo nuevamente a Thomson y Emery (2014), en un sistema de coordenadas cartesianas con referencia a la Tierra, las componentes horizontales de la velocidad se pueden resolver en: 1) componentes hacia el este-oeste (zonal, u) y hacia el norte-sur (meridional, v) o 2) a lo largo de la batimetría local (paralela) y a través de ella (perpendicular). El vector de velocidad horizontal se puede representar en coordenadas cartesianas como una función compleja $w(t)$ (Figura 4.8)

cuya parte real, $u(t)$, es la proyección del vector sobre el eje zonal o paralela, y cuya parte imaginaria, $v(t)$, es la proyección del vector sobre el eje meridional o perpendicular.

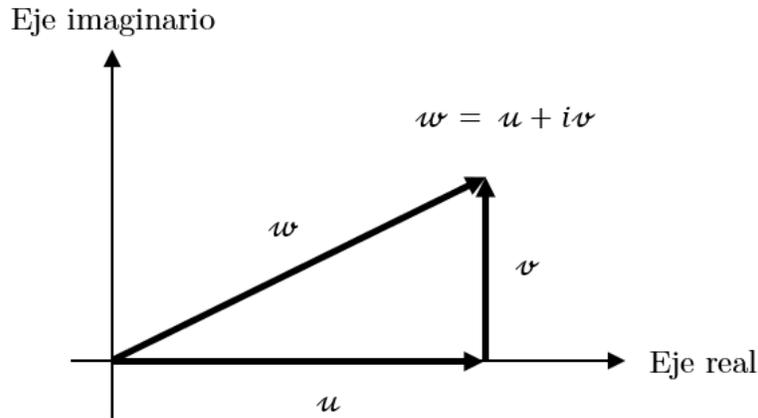


Figura 4.8. Velocidad horizontal representada como un vector complejo, $w = u + iv$, con componentes u y v a lo largo de los ejes real e imaginario, respectivamente. Adaptado de Thomson y Emery (2014).

El análisis rotatorio de las corrientes implica la separación del vector de velocidad para una frecuencia especificada ω , en componentes circulares rotatorias en sentido horario y antihorario con amplitudes A^+ , A^- , y fases relativas θ^+ , θ^- respectivamente. Así, en lugar de tratar con dos componentes cartesianos, tratamos con dos componentes circulares. El motivo para utilizar un análisis rotatorio es, sobre todo, porque la separación de un vector de velocidad en componentes de rotación opuesta puede revelar aspectos importantes del campo de ondas en las frecuencias especificadas; este método ha demostrado ser especialmente útil para investigar corrientes sobre topografía abrupta, movimientos inerciales generados por el viento, ondas de plataforma continental de frecuencia diurna y otras formas de flujo oscilatorio de banda estrecha.

Para conocer el fundamento del análisis rotatorio, primero se escribe el vector $w(t)$ en serie de Fourier como:

$$\begin{aligned}
w(t) &= \overline{u(t)} + \sum_{k=1}^N U_k \cos(\omega_k t - \phi_k) + i \left[\overline{v(t)} + \sum_{k=1}^N V_k \cos \omega_k t - \theta_k \right] \\
&= [\overline{u(t)} + i\overline{v(t)}] \\
&\quad + \sum_{k=1}^N [U_k \cos(\omega_k t - \phi_k) + iV_k \cos(\omega_k t - \theta_k)]
\end{aligned} \tag{4.17}$$

donde $\overline{u(t)} + i\overline{v(t)}$ es la media de la velocidad, $\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi k/N\Delta t$ es la frecuencia angular, $t = n\Delta t$ es el tiempo, y (U_k, V_k) y (ϕ_k, θ_k) son las amplitudes y las fases respectivas de las constituyentes de Fourier para las componentes reales e imaginarias. Al sustraer la velocidad media y al expandir las funciones trigonométricas se obtiene:

$$\begin{aligned}
w'(t) &= \sum_{k=1}^N \{U_{1k} \cos(\omega_k t) + U_{2k} \sin(\omega_k t) \\
&\quad + i[V_{1k} \cos(\omega_k t) + V_{2k} \sin(\omega_k t)]\}
\end{aligned} \tag{4.18}$$

donde se define las funciones pares (U_{1k}, V_{1k}) y las impares (U_{2k}, V_{2k}) como,

$$\begin{aligned}
U_{1k} &= U_k \cos \phi_k, & U_{2k} &= U_k \sin \phi_k \\
V_{1k} &= V_k \cos \phi_k, & V_{2k} &= V_k \sin \theta_k
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Quitando la notación prima se tiene

$$w(t) = \sum_{k=1}^N w_k(t) \tag{4.20}$$

y escribiendo el seno y coseno como exponenciales complejas, se obtiene

$$\begin{aligned}
w_k(t) &= \frac{U_{1k}}{2} (e^{i\omega_k t} + e^{-i\omega_k t}) + \frac{U_{2k}}{2i} (e^{i\omega_k t} - e^{-i\omega_k t}) \\
&\quad + \frac{iV_{1k}}{2} (e^{i\omega_k t} + e^{-i\omega_k t}) + \frac{V_{2k}}{2} (e^{i\omega_k t} - e^{-i\omega_k t})
\end{aligned} \tag{4.21}$$

Al reorganizar la ecuación anterior, $w(t)$ puede escribirse como

$$\begin{aligned} w_k(t) = & \frac{1}{2} [(U_{1k} + V_{2k})^2 + (U_{2k} - V_{1k})^2]^{\frac{1}{2}} e^{i\varepsilon_k^+} e^{i\omega_k t} \\ & + \frac{1}{2} [(U_{1k} - V_{2k})^2 + (U_{2k} + V_{1k})^2]^{\frac{1}{2}} e^{i\varepsilon_k^-} e^{-i\omega_k t} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Así, se puede escribir el k -ésimo componente de frecuencia de la serie como la suma de las componentes en sentido antihorario (+) y en sentido horario (-), es decir,

$$w_k(t) = w_k^+(t) + w_k^-(t) = A_k^+ e^{i\varepsilon_k^+} e^{i\omega_k t} + A_k^- e^{i\varepsilon_k^-} e^{-i\omega_k t} \quad (4.23)$$

donde las amplitudes de las componentes rotatorias en sentido antihorario y horario están dadas por

$$A_k^+ = \frac{1}{2} [(U_{1k} + V_{2k})^2 + (U_{2k} - V_{1k})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4.24)$$

$$A_k^- = \frac{1}{2} [(U_{1k} - V_{2k})^2 + (U_{2k} + V_{1k})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4.25)$$

En tanto los ángulos de fase correspondientes para el tiempo $t = 0$ son

$$\varepsilon_k^+ = \tan^{-1} \left(\frac{V_{1k} - U_{2k}}{U_{1k} + V_{2k}} \right) \quad (4.26)$$

$$\varepsilon_k^- = \tan^{-1} \left(\frac{U_{2k} + V_{1k}}{U_{1k} - V_{2k}} \right) \quad (4.27)$$

Si los ángulos de fase se escriben como

$$\varepsilon_k^+ = \frac{\varepsilon_k^+ + \varepsilon_k^-}{2} + \frac{\varepsilon_k^+ - \varepsilon_k^-}{2}, \quad \varepsilon_k^- = \frac{\varepsilon_k^+ + \varepsilon_k^-}{2} - \frac{\varepsilon_k^+ - \varepsilon_k^-}{2} \quad (4.28)$$

la ecuación 4.23 también se puede ver como

$$w_k(t) = e^{\left[\frac{i(\varepsilon_k^+ + \varepsilon_k^-)}{2} \right]} \left\{ A_k^+ e^{\left[\frac{i(\varepsilon_k^+ - \varepsilon_k^-)}{2} \right]} e^{i\omega_k t} + A_k^- e^{\left[-\frac{i(\varepsilon_k^+ - \varepsilon_k^-)}{2} \right]} e^{i\omega_k t} \right\} \quad (4.29)$$

Definiendo los ángulos

$$\theta_k = \frac{\varepsilon_k^+ + \varepsilon_k^-}{2}, \quad \beta_k = \frac{\varepsilon_k^+ - \varepsilon_k^-}{2} \quad (4.30)$$

y con la relación de Euler, la ecuación (4.23) quedaría

$$w_k(t) = e^{i\theta_k} \{ [A_k^+ + A_k^-] \cos(\omega_k t + \beta_k) + i [A_k^+ - A_k^-] \sin(\omega_k t + \beta_k) \} \quad (4.31)$$

Al elevar al cuadrado la parte real e imaginaria de la ecuación anterior y al dividirla sobre $[A_k^+ + A_k^-]$ y $[A_k^+ - A_k^-]$ respectivamente, se tiene la descripción de una elipse en el plano complejo, con una inclinación de un ángulo θ en el semieje mayor. Esto se representa en la Figura 4.9, donde la suma de los vectores circulares de rotación opuesta (Figura 4.9.a y 4.9.b) hace que la punta del vector combinado (Figura 4.9.c) trace una elipse en un ciclo completo. La excentricidad de esta elipse está determinada por las amplitudes relativas de las dos componentes rotatorias. Cuando las amplitudes de las componentes tienen la misma magnitud el movimiento es rectilíneo, es decir, de ida y vuelta a lo largo de la misma línea.

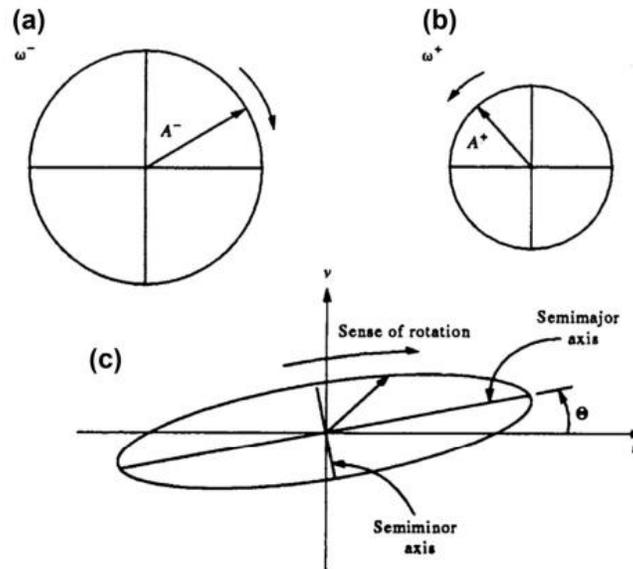


Figura 4.9. Elipses de corriente formadas por la suma de vectores de rotación opuesta. (a) componente en sentido horario (w^-) y (b) componente en sentido antihorario (w^+) con amplitudes A_k^- y A_k^+ respectivamente. (c) Caso general de movimiento elíptico con eje mayor inclinado en un ángulo θ en sentido antihorario desde el este, donde el semieje mayor tiene una longitud $L_M = [A_k^+ + A_k^-]$ y el semieje menor una longitud $L_m = [A_k^+ - A_k^-]$. Recuperado de Thomson y Emery (2014).

Los espectros de las dos componentes de rotación opuesta para las frecuencias $f_k = \omega_k/2\pi$ son

$$S(f_k^+) = S_k^+ = \frac{(A_k^+)^2}{N\Delta t}, \quad f_k = 0, \dots, 1/(2\Delta t) \quad (4.32)$$

$$S(f_k^-) = S_k^- = \frac{(A_k^-)^2}{N\Delta t}, \quad f_k = -1/(2\Delta t), \dots, 0 \quad (4.33)$$

Desarrollando los valores de las amplitudes con las ecuaciones (4.24) y (4.25), los espectros se calcularían como

$$S_k^+ = \frac{1}{2} [S_{UU}(f_k) + S_{VV}(f_k) + 2Q_{UV}(f_k)] \quad (4.34)$$

$$S_k^- = \frac{1}{2} [S_{UU}(f_k) + S_{VV}(f_k) - 2Q_{UV}(f_k)] \quad (4.35)$$

donde el autoespectro de U es

$$S_{UU}(f_k) = \frac{(U_{1k}^2 + U_{2k}^2)}{2N\Delta t} \quad (4.36)$$

el autoespectro de V es

$$S_{VV}(f_k) = \frac{(V_{1k}^2 + V_{2k}^2)}{2N\Delta t} \quad (4.37)$$

y el espectro en cuadratura de U y V es

$$Q_{UV}(f_k) = \frac{(U_{1k}V_{2k} - U_{2k}V_{1k})}{2N\Delta t} \quad (4.38)$$

Al igual que en el análisis de Fourier, se puede obtener la PT de los espectros de las dos componentes de rotación como

$$PT(S_k^+) = \int S(f_k^+)df = \int S_k^+df \quad (4.39)$$

$$PT(S_k^-) = \int S(f_k^-)df = \int S_k^- df \quad (4.40)$$

A partir de los espectros S_k^+ y S_k^- se puede calcular el coeficiente rotatorio $r(\omega)$, el cual indica el sentido del movimiento rotatorio

$$r(\omega) = \frac{S_k^+(\omega) - S_k^-(\omega)}{S_k^+(\omega) + S_k^-(\omega)} \quad (4.41)$$

donde

$$r \begin{cases} < 0 & \text{sentido horario} \\ = 0 & \text{flujo unidireccional,} \\ > 0 & \text{sentido antihorario} \end{cases} \quad -1 \leq r \leq 1 \quad (4.42)$$

En este trabajo se estimaron los espectros del campo de velocidad horizontal en el sistema coordenado rotado (paralela, perpendicular). A partir de los espectros de los puntos seleccionados, se identificaron las bandas de frecuencia significativas. Posteriormente, para cada banda frecuencia se calculó el coeficiente rotatorio. Los resultados se muestran en términos de periodo (T), el cual es el inverso de la frecuencia f .

Capítulo 5

Métricas del Sistema de la Corriente del Lazo

En este capítulo se muestran los resultados de las métricas de la CL y de los RCL junto con su respectiva discusión. Para comprobar que el marco metodológico que se utilizó en este trabajo de tesis es adecuado para poder monitorear al SCL y calcular sus métricas, se colocó un apartado en cada sección que compara los resultados de este trabajo con los que se encuentran en las observaciones publicadas.

5.1. Métricas de la Corriente del Lazo

Las métricas de la CL, calculadas de acuerdo con lo descrito en la sección 4.1.1, se muestran como histogramas en las siguientes cinco Figuras (de la 5.1 a la 5.5), con su descripción de cada una. En las discusiones se nota que bajos o altos valores de las métricas se pueden relacionar con los RCL, por lo cual se abordaron los eventos de separación registrados (Tabla 5.4).

Aunque las cinco métricas también se representan como series de tiempo, éstas no se muestran en los resultados debido a su alta cantidad de elementos (son 10,016 valores por cada métrica, dada la resolución y cobertura temporal del producto CMEMS). No obstante, se está trabajando para que los datos sean incluidos en un repositorio en la base de datos de UNINMAR del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, y en el sistema de pronóstico oceánico del Golfo de México del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM.

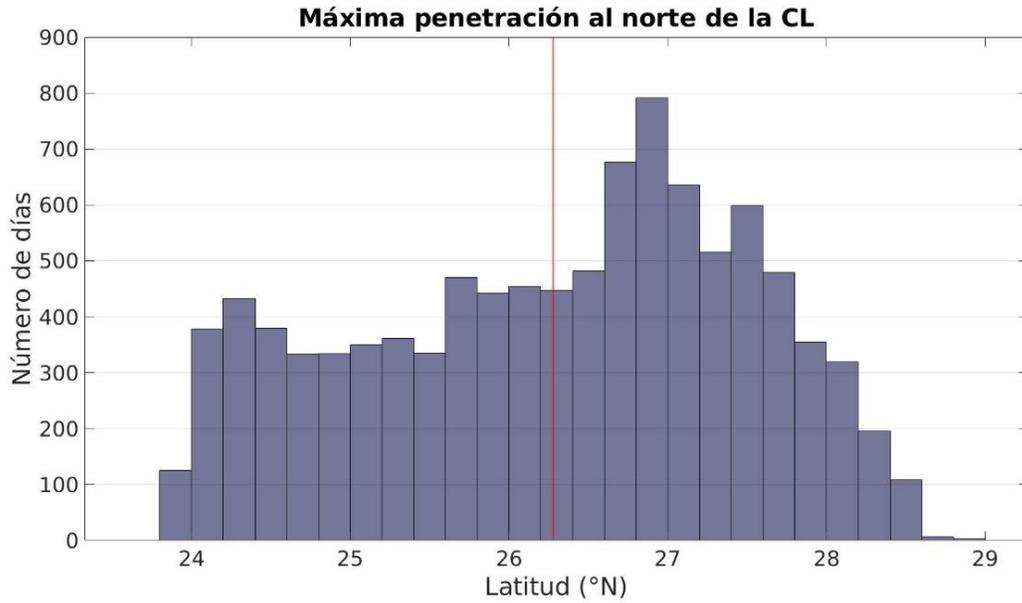


Figura 5.1. Histograma de la métrica de máxima penetración al norte de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.

La CL tiene una máxima penetración al norte de 23.8°N a 28.9°N, con una media a los 26.3°N. Los valores más frecuentes de esta métrica, como se observa en la Figura 5.1, se ubican en el rango de 26.8–27.0°N. El valor mínimo de esta métrica es de 23.8°N, correspondiente al 30 de enero de 1996, día en el que la CL arrojó un remolino no considerado como evento de separación de acuerdo con la definición proporcionada en la metodología (sección 4.1.2). En solo nueve ocasiones la CL supera una penetración de 28.6°N, registradas en abril y junio del 2007, llegando a las cercanías de la desembocadura del río Mississippi.

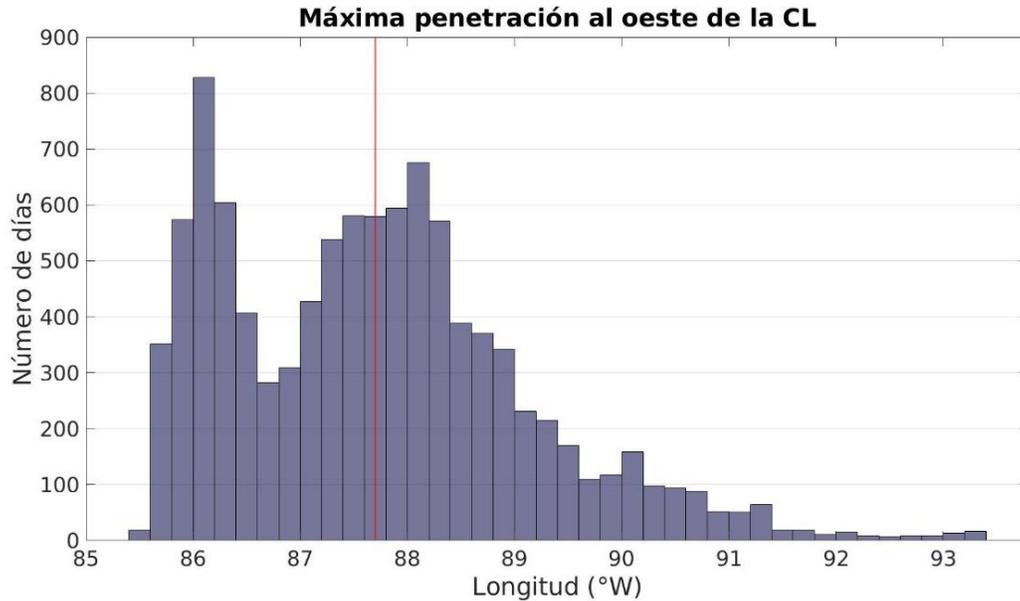


Figura 5.2. Histograma de la métrica de máxima penetración al oeste de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.

En la Figura 5.2 se muestra que la métrica de máxima penetración al oeste de la CL tiene una distribución bimodal, observándose dos rangos de valores principales, uno en 86.0–86.2°W y el otro en 88.0–88.2°W, con una media a los 87.7°W. El valor más frecuente de esta métrica (moda) es de 86.1°W. Los mínimos valores de penetración de la CL son menores a 85.6°W, identificándose a mediados-finales de abril del 2016, días después de que el remolino número 33 se separara de la CL (ver Tabla 5.4 para más información). Los valores máximos de esta métrica (>93.0°W) ocurren en dos ocasiones, siendo la primera a principios-mediados de febrero del 2002 y la segunda a principios de septiembre del 2005; en ambas situaciones la CL tiene una gran penetración al oeste porque seguidamente un RCL se separa de ésta (remolinos número 12 y 16, respectivamente, ver Tabla 5.4).

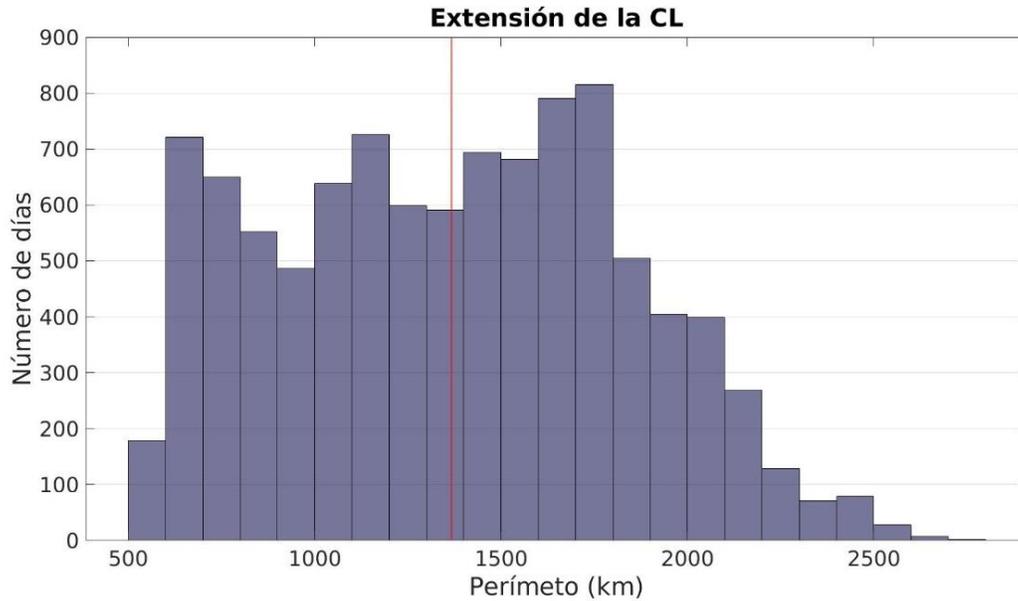


Figura 5.3. Histograma de la métrica de extensión de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.

La CL tiene una extensión (Figura 5.3) de poco más de 540 km hasta más de 2700 km, con una media a los 1367 km. Aproximadamente el 80% de los valores de la métrica de extensión se centran entre los 600 y 1800 km. Los valores mínimos de extensión de la CL (<560 km) ocurren en dos ocasiones, una a mediados de agosto de 1996 y la otra a finales de junio de 1998. La primera sucede justamente después de que el remolino número 7 se separa de la CL (ver Tabla 5.4 y Figura 5.7.c), en tanto la segunda ocurre cuando el remolino número 36 se desprende por segunda vez de la CL, poco antes de su separación final (ver Tabla 5.4). Por el otro lado, los valores más altos en la longitud de la CL (>2600 km) suceden exactamente antes que los remolinos número 12, 17 y 31 se separaran de la corriente, de ahí deriva que el remolino número 12 tuviera un diámetro grande (ver Tabla 5.4 y Figura 5.11).

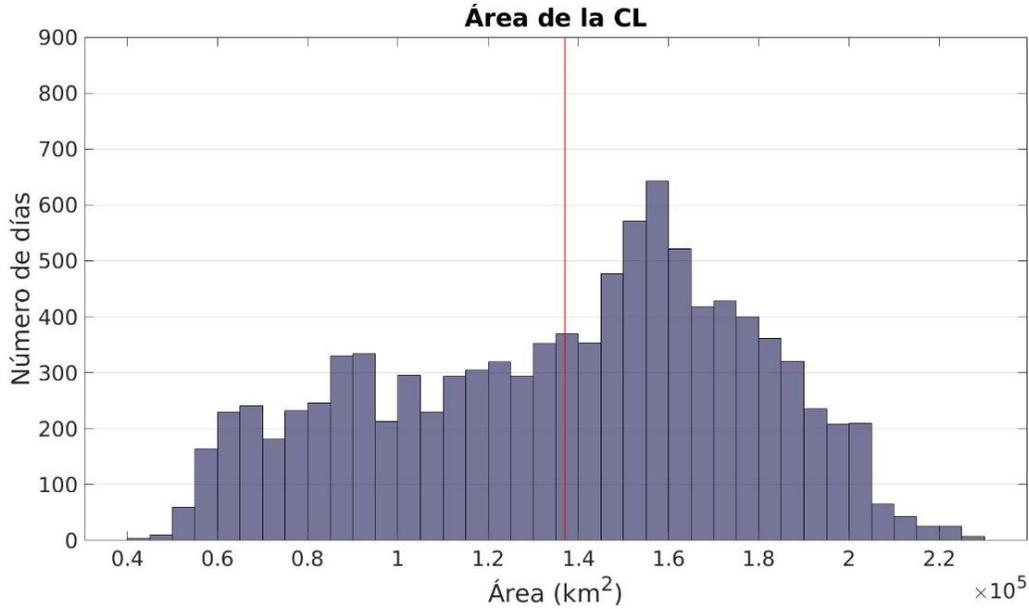


Figura 5.4. Histograma de la métrica de área de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.

La CL adquiere un área de 44,743 km² hasta 225,833 km², con una media en ~137,000 km². En la Figura 5.4 se muestra que la métrica de área tiene una distribución asimétrica negativa, con valores más frecuentes en el rango de 150,000–160,000 km². Los valores mínimos de área de la CL (<50,000 km²) ocurren a finales de junio y principios de julio del 2018, después de que el remolino número 36 se desprendiera por segunda vez de la CL (no en la fecha de separación final); este remolino se ha relacionado con los valores mínimos de dos métricas (extensión y área). La mayor área registrada en la CL (>224,000 km²) se encuentra a principios de febrero del 2002, antes que el remolino número 12 se desprendiera, al igual que como se discutió en la métrica de extensión.

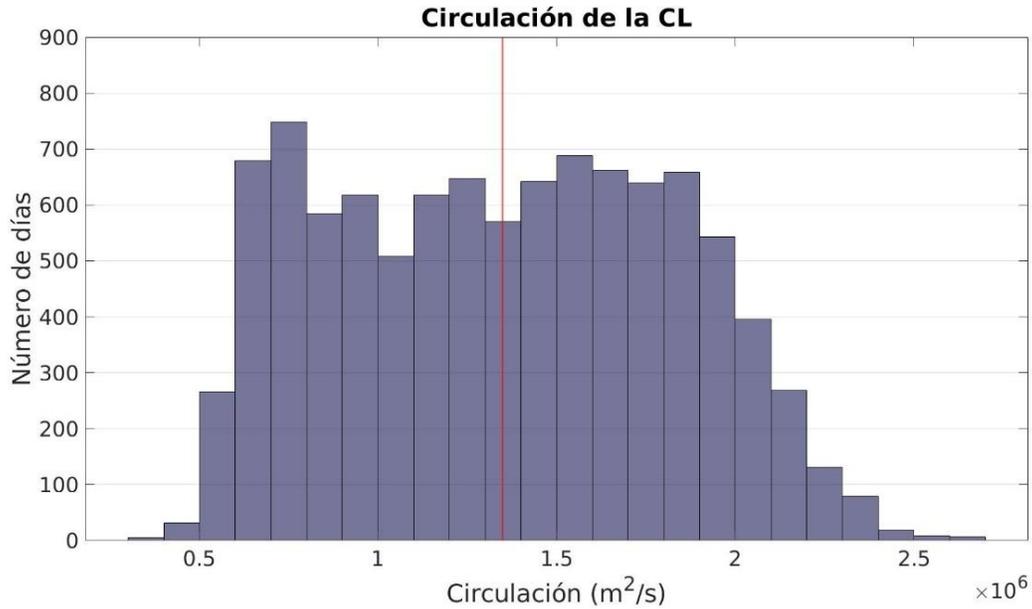


Figura 5.5. Histograma de la métrica de circulación de la Corriente del Lazo. La línea roja representa la media de la métrica.

La métrica de circulación en la CL tiene valores en un rango de $370,789 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $2,664,841 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, con una media en $1,348,496 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 5.5). Aproximadamente el 88% de los datos se centran entre los $600,000\text{--}2,000,000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, rango en el cual los datos se ven uniformes. Los valores mínimos de esta métrica ($<450,000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ocurren en septiembre del 2009, noviembre del 2011 y junio del 2012; solamente este último corresponde a un remolino (remolino número 28, ver Tabla 5.4). Los valores máximos de la circulación de la CL ($>2,500,000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) se encuentran en dos ocasiones, uno en julio del 2003 y otro en mayo del 2005; únicamente el último indica la separación de un remolino, el remolino número 31, el cual ya se ha hallado en los valores máximos de dos métricas (extensión y circulación).

Como se puede notar, el uso de las métricas de la CL permite entender el comportamiento del SCL, en especial la relación con los eventos de separación de los remolinos. En particular, la métrica de extensión en la que tiene mayor relación con las demás métricas y con los eventos de separación de los remolinos. En cambio, la métrica de circulación es la menos relacionada con los RCL; esto es contrario a los resultados de Hamilton et al., (2000) y Leben (2005), quienes

indicaron que la métrica de circulación mostró un crecimiento más uniforme durante un evento de intrusión y mayor aumento justo antes de la separación.

5.1.1. Comparación con las observaciones

Con la finalidad de conocer si los resultados de este trabajo de tesis fueron similares a los que se encuentran en la literatura científica, éstos se compararon con Leben (2005).

Aunque la metodología reproducida aquí (explicada en la sección 4.1) es una réplica de lo que hizo Leben, existen principalmente dos diferencias en ambas. La primera diferencia es el contorno utilizado: Leben utilizó el contorno SSH-17 cm y en este trabajo se utilizó el de ADT-17 cm (ver diferencias de estas variables en la sección 2.1, Figura 2.2). La segunda diferencia es el periodo de análisis: la serie de tiempo de Leben es de 11.5 años (del 1 de enero de 1993 al 1 de julio de 2004) y en esta tesis se trabajó con una serie de tiempo de ~27 años (1993-2020).

Una manera de realizar la comparación de los resultados es mediante los histogramas. En la Figura 5.6 se muestran los histogramas resultantes de Leben, los cuales son similares en distribución a los histogramas resultantes de este trabajo. Los máximos valores se ubicaron en las mismas cercanías, por ejemplo, en las métricas de máxima longitud, extensión y área estos valores se encontraron después de la media correspondiente. La métrica de la máxima longitud también tuvo una distribución bimodal, con la media localizada entre los 87.7–87.9°W. Fue el histograma de la métrica de circulación en el que no se encontró parecido a la distribución con respecto a los resultados propios, aunque la media se localizó en los mismos rangos ($\sim 1.3 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

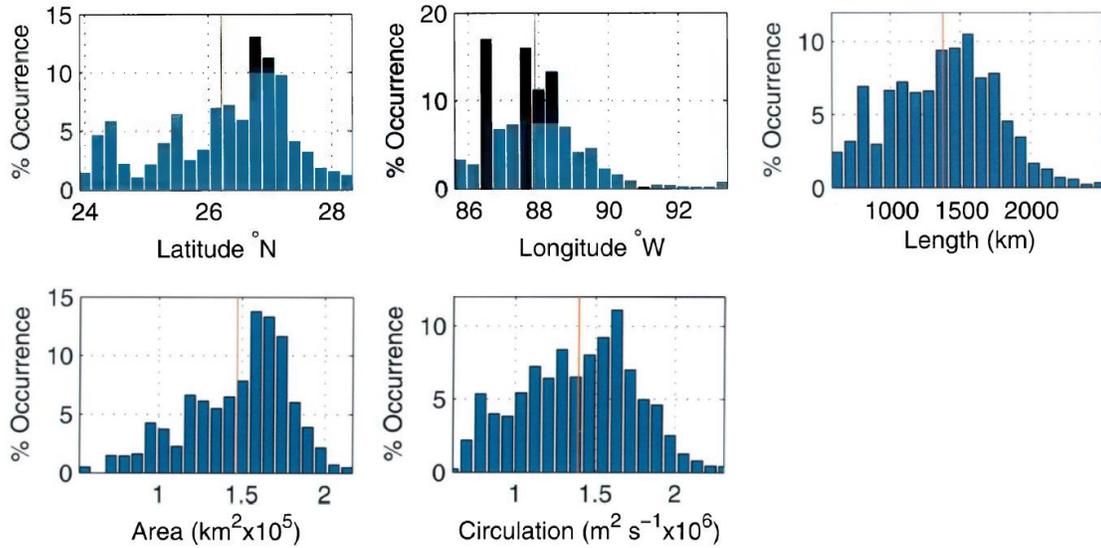


Figura 5.6. Histogramas de porcentaje de ocurrencia de las métricas de la CL. Las líneas verticales rojas superpuestas muestran los valores medios. Recuperado de Leben (2005).

Otra manera de realizar la comparación de resultados es con estadísticos. La comparación estadística de las cinco métricas se encuentra en la Tabla 5.1, en tanto en la Tabla 5.2 están las variaciones porcentuales,

$$\text{Variación (\%)} = \frac{V_2 - V_1}{V_1} * 100 \quad (5.1)$$

donde V_1 son los estadísticos de Leben y V_2 los estadísticos de este trabajo.

Tabla 5.1. Estadísticos de las métricas de la Corriente del Lazo comparados con los resultados de Leben (2005).

Métrica	Máxima penetración al norte (°N)		Máxima penetración al oeste (°W)		Extensión (km)		Área (km ²)		Circulación (m ² ·s ⁻¹)	
	Trabajo de tesis	Leben (2005)	Trabajo de tesis	Leben (2005)	Trabajo de tesis	Leben (2005)	Trabajo de tesis	Leben (2005)	Trabajo de tesis	Leben (2005)
Mínimo	23.8	24.1	85.5	85.8	544	614	44,743	55,840	370,789	611,420
Máximo	28.9	28.1	93.3	93.1	2,717	2,494	225,833	213,540	2,664,841	2,311,200
Media	26.3	26.2	87.7	87.9	1,367	1,376	137,050	147,240	1,348,496	1,396,200

Tabla 5.2. Variación porcentual en los estadísticos de las métricas obtenidos en el trabajo de tesis con los publicados por Leben (2005).

Métrica \ Estadístico	Máxima penetración al norte	Máxima penetración al oeste	Extensión	Área	Circulación
Mínimo	-1.24	-0.35	-11.40	-19.87	-39.36
Máximo	2.85	0.21	8.94	5.76	15.30
Media	0.38	-0.23	-0.65	-6.92	-3.42

Las métricas de máxima penetración de la CL son las que tienen valores más semejantes en ambos estudios. Las diferencias en las medias fueron de 0.1°N y 0.2°W en la penetración al norte y al oeste, respectivamente, con poca variación en los valores mínimos y máximos ($<0.8^{\circ}\text{N}$); las magnitudes de las variaciones porcentuales en los distintos estadísticos de estas dos métricas son menores al 2.9%.

Para la métrica de extensión, los resultados de este trabajo son diferentes a los de Leben por 70 km para el valor mínimo, 223 km para el valor máximo, y 9 km para la media con variaciones porcentuales de -11.4, 8.9 y -0.6, respectivamente. Este último estadístico indica que la CL presentó una extensión media menor a la que Leben encontró.

En la métrica de área hay una diferencia de $11,097\text{ km}^2$ en el valor mínimo, $12,293\text{ km}^2$ en el valor máximo y $10,190\text{ km}^2$ en la media, con variaciones porcentuales de -19.9, 5.8 y -6.9, respectivamente. Este último estadístico es el que tiene mayor variación porcentual de entre todas las medias de las métricas.

Por último, los resultados de la métrica de circulación de la CL son los que tienen las mayores diferencias en los valores mínimos, con $240,631\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (variación porcentual de -39.4), poco más de la mitad del valor publicado por Leben. La diferencia en los valores máximos es de $353,641\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ y en la media es de $47,704\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, con variación porcentual de 15.3 y -3.4. Al no ser necesariamente similares los estadísticos de esta métrica, se planteó el cuestionamiento de si la metodología llevada a cabo aquí no reflejaba de manera correcta la circulación de la CL, o si se debía a un cambio de comportamiento en la circulación, reflejado después del periodo de tiempo en el que Leben realizó su estudio. Por eso, se calculó nuevamente esta métrica para el periodo de análisis

de Leben, es decir, de enero de 1993 a julio del 2004, y se obtuvieron los estadísticos con el fin de compararlos (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Comparación de estadísticos de la métrica de circulación de la CL en el periodo del 1 de enero de 1993 al 1 de julio del 2004.

Métrica \ Estadístico	Circulación de la CL $m^2 \cdot s^{-1}$	
	Trabajo de tesis	Leben (2005)
Mínimo	472,982	611,420
Máximo	2,610,132	2,311,200
Media	1,385,597	1,396,200

De esta tabla se observa que aunque la diferencia en los valores mínimos se redujo, ésta sigue siendo la métrica con mayor variación en los resultados comparados. Si bien los valores de la métrica son físicamente consistentes, las diferencias entre éstos y los publicados por Leben son evidentes. Considerando que ambas metodologías utilizaron la misma ecuación para calcular la circulación (ecuación 4.3) y que la resolución de ambas mallas fueron de 0.25° , una posible causa sería algún proceso de filtrado implementado por Leben, lo cual se observa de las series temporales de la métrica o bien el contorno que se utilizó para el cálculo de la métrica: Leben ocupa un contorno cerrado y en este trabajo se utilizó el contorno (no cerrado) de ADT-17 cm, como se especificó en la Figura 4.3.

De manera general, las métricas en este trabajo tienen mayor rango (los valores mínimos son menores a los publicados por Leben y los valores máximos son mayores). Las medias de las métricas de este trabajo, a excepción de la métrica de máxima penetración al norte, son menores a las publicados por Leben, con una varianza $<7\%$.

Esta sección de comparación proporcionó resultados satisfactorios, indicando que el método para estudiar al SCL realizado en este trabajo de tesis es robusto, y puede utilizarse para monitorear el comportamiento de dicho sistema.

5.2. Métricas de los Remolinos de la Corriente del Lazo

Las métricas de los eventos de separación de remolinos se obtuvieron a partir de lo especificado en la sección 4.1.2 y se encuentran en la Tabla 5.4, añadiendo también la latitud de retraimiento de la CL. La métrica de estacionalidad se encuentra implícita en la fecha de separación. En total, se registraron 38 eventos de separación de remolinos en la serie de 27 años. Estos remolinos fueron registrados bajo el nombre industrial proporcionado y asignado por la página de *Horizon Marine*, considerando la descripción de cada uno. En el apéndice B se encuentran las figuras de los contornos de la CL y de los RCL al momento de la separación, señalando la latitud de retraimiento que tuvo la CL.

Los eventos de separación fueron registrados como se especificó en la metodología (sección 4.1.2). Sin embargo, existió solo un caso en el que la separación de un remolino no correspondía a cambios abruptos en las series de tiempo de las métricas de la CL. Se trata del remolino número 7 (Creole), el cual se desprendió el 20 de octubre de 1996 de acuerdo con la definición de evento de separación. No obstante, en la Figura 5.7 se muestra que las métricas de la CL reducen sus valores significativamente, características propias que se ven cuando un remolino se separa, el día 10 de agosto de 1996 (banda roja), y no el 20 de octubre (banda azul). De esto se infiere que el remolino número 7 se separó antes de lo registrado con la definición de evento de separación proporcionada por Leben (2005).

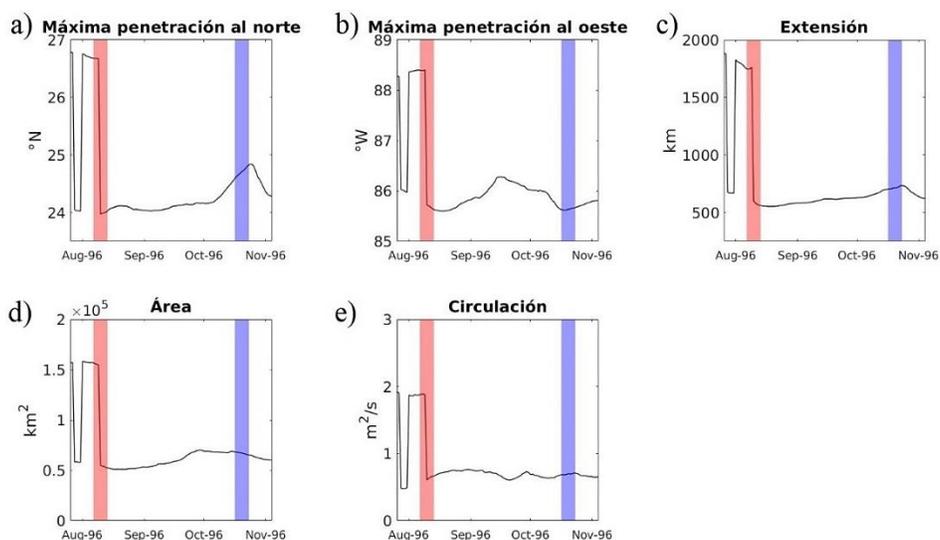


Figura 5.7. Métricas de la CL referentes al remolino número 7. La banda roja señala la fecha de 10 de agosto de 1996 y la banda azul la fecha de 20 de octubre del mismo año.

En los remolinos restantes sí se tiene un acuerdo entre los cambios abruptos de los valores de las métricas con las fechas de separación registradas.

Tabla 5.4. Eventos de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo registrados junto con sus métricas. Los nombres industriales de los remolinos se obtuvieron en la página <https://www.horizonmarine.com/loop-current-eddies>

No.	Nombre Industrial	Fecha de separación	Periodo de separación (días)	Diámetro (km)	Latitud de retraimiento (°N)
1	Whopper	08-jul-1993	-	249	27.68
2	Xtra	07-sep-1993	61	319	26.69
3	Yucatán	22-ago-1994	349	285	26.10
4	Zapp	18-abr-1995	239	247	27.32
5	Aggie	07-sep-1995	142	223	26.10
6	Biloxi	15-mar-1996	190	203	26.76
7	Creole	10-ago-1996 ^a	148	369	23.97
8	El Dorado	26-sep-1997	412	288	25.33
9	Fourchon	10-abr-1998	196	397	26.40
10	Juggernaut	03-oct-1999	541	410	24.26
11	Millenium	07-abr-2001	552	308	25.60
12 ^b	Pelagic	27-feb-2002	326	637	24.34
13	Sargassum	09-ago-2003	528	239	26.78
14	Titanic	22-dic-2003	135	218	26.40
15	Ulysses	24-ago-2004	246	390	24.61
16	Vortex	11-sep-2005	383	271	26.99
17	Walker	08-feb-2006	150	176	27.57
18	Xtreme	03-mar-2006	23	240	25.99
19	Yankee	17-sep-2006	198	319	26.31
20	Albert	13-nov-2007	422	291	26.63
21	Brazos	03-abr-2008	142	217	26.58

22	Cameron	28-jun-2008	86	190	26.13
23	Darwin	26-feb-2009	243	316	25.27
24	Ekman	02-ago-2009	157	369	24.45
25	Franklin	11-ago-2010	374	229	25.52
26	Hadal	24-jul-2011	347	371	25.54
27	Icarus	11-ene-2012	171	247	25.10
28	Jumbo	14-jun-2012	155	432	23.99
29	Kraken	19-may-2013	339	275	26.19
30	Lazarus	05-nov-2014	535	159	27.53
31	Nautilus	15-may-2015	191	326	27.59
32	Olympus	04-dic-2015	203	180	27.13
33	Poseidon	07-abr-2016	125	412	24.34
34	Quantum II ^c	17-nov-2017	589	185	25.41
35	Quantum	11-feb-2018	86	300	25.77
36	Revelle	06-jul-2018	145	389	24.25
37	Sverdrup	05-jul-2019	364	342	24.96
38	Thor	29-mar-2020	268	299	26.24
	Media		264	298	25.89

^a La fecha de separación se discutió anteriormente, considerando la Figura 5.7.

^b Se considera como un solo remolino de más de 600 km de diámetro, aunque éste poco después se divide en otro remolino, con nombre industrial *Quick*, como se puede observar en la Figura 5.11.

^c De acuerdo con la página de Horizon Marine, el remolino Quantum se desprendió antes que Quantum II, pero éste primero se volvió a unir después a la CL, para finalmente separarse en su totalidad. Por esta razón, en esta tabla, Quantum II se encuentra primero que Quantum.

Los histogramas de las métricas de los RCL se muestran en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10.



Figura 5.8. Histograma de la métrica de la estacionalidad de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo.

En todos los meses se registraron separaciones de RCL, siendo agosto (seis remolinos) y abril y septiembre (cinco remolinos cada uno) los meses con más eventos de separación, en tanto enero y octubre (solamente un remolino cada uno) fueron los meses con menores eventos (Figura 5.8). De los 38 remolinos registrados, y considerando las fechas establecidas para las estaciones, quince de ellos se separaron en verano, nueve en primavera, ocho en invierno y seis en otoño. En estudios previos ya se había reportado que verano es la estación con mayor número de eventos de separación (por ejemplo, Vukovich, 1995; Alvera-Azcárate et al., 2009). Chang y Oey (2012) indicaron que la preferencia estacional observada del desprendimiento de los RCL (más en verano e invierno y menos en otoño y primavera) se deben a una combinación de forzamiento por los vientos estacionales en el Mar Caribe y el Golfo de México. No obstante, el periodo de registro de separaciones de RCL sigue siendo corto para asegurar que la CL tiene una preferencia estacional de desprendimiento de remolinos.

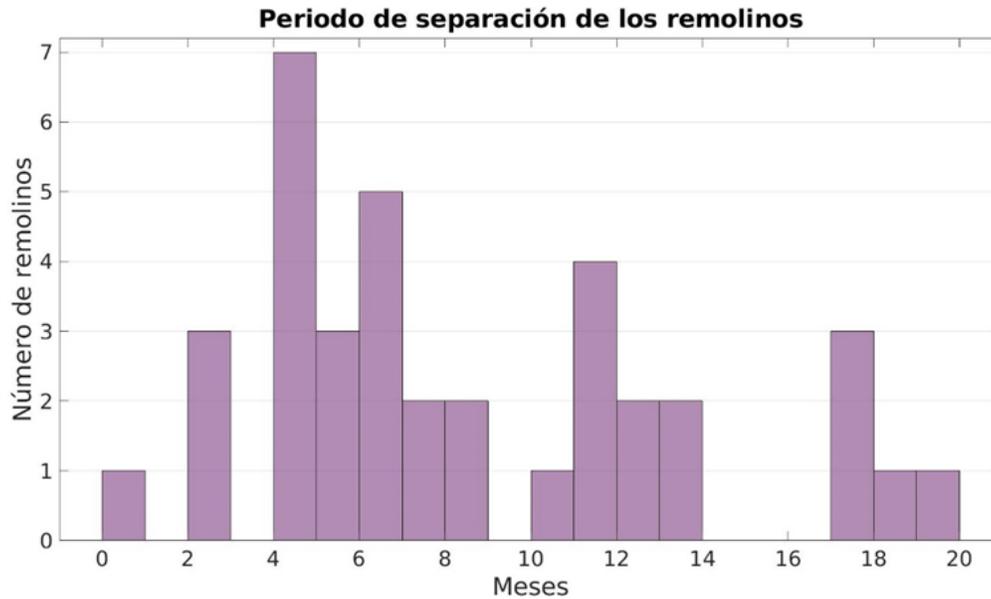


Figura 5.9. Histograma de la métrica de la periodicidad de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo.

En promedio cada año se desprendieron de uno a dos RCL, variando de cero remolinos desprendidos en el año 2000, hasta tres remolinos en el año 2006. Los periodos de separación de los RCL (Figura 5.9) varían de ~2 semanas hasta poco más de 19 meses, rango acorde a lo publicado por otros estudios (Vukovich 2007; Sturges y Leben, 2000; Leben, 2005; Hall y Leben, 2016). El periodo promedio en las separaciones es de 8.7 meses. Se encontraron tres rangos máximos, el primero a los 4–5 meses (7 remolinos), el segundo a los 6–7 meses (5 remolinos) y el tercero a los 11–12 meses (4 remolinos); es este último el de mayor interés, discutido en la sección 3.1.2, dado que no se encuentra en el periodo anual. Sin embargo, como se discutió en la métrica de estacionalidad, los remolinos registrados siguen siendo insuficientes para determinar el intervalo primario de desprendimientos de RCL.

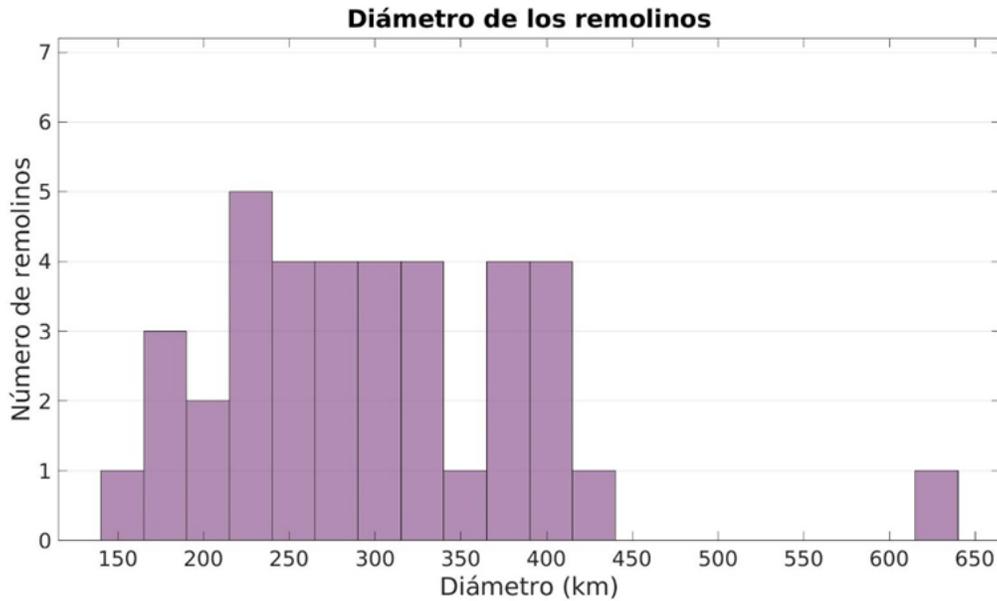


Figura 5.10. Histograma de la métrica de los diámetros de los Remolinos de la Corriente del Lazo.

Los diámetros de los RCL en el lapso de 27 años varían de 159 km hasta 637 km, con una media en los ~298 km y con una mayor frecuencia en 215–240 km. Sin embargo, en la Figura 5.10 se nota que los valores están agrupados en el rango de 159–432 km, acorde con lo reportado en la literatura. Esta métrica tuvo un valor atípico de 637 km, tratándose del remolino número 12, el cual se separó de la CL el día 27 de febrero del 2002 (Figura 5.11.a), pero se dividió en dos remolinos en los siguientes tres días (Figura 5.11.b). Al momento de dividirse, los remolinos tenían un diámetro de 411 km y 201 km respectivamente. No obstante, este suceso se registró en la Tabla 5.4 como un solo remolino, ya que el segundo no cumple la definición de evento de separación, es decir, no se separó de la CL. De hecho, el segundo remolino sí se ha registrado como evento de separación en otras bases de datos (por ejemplo, Leben, 2005; Hall y Leben, 2016) con nombre industrial Quick.

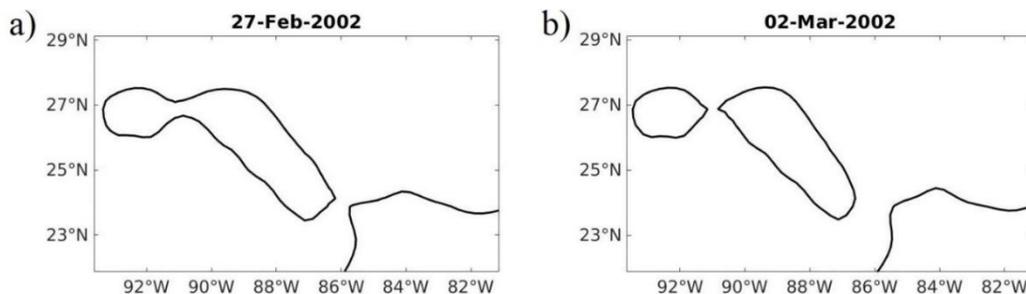


Figura 5.11. Remolino número 12. a) El 27 de febrero del 2002 un remolino con un diámetro mayor a 600 km se separó de la CL y b) ese mismo remolino se dividió en dos el 02 de marzo del 2002.

Adicionalmente, se realizó un análisis de las relaciones encontradas por Leben (2005) y Alvera-Azcárate et al. (2009) discutidas en la sección 3.1.2. Los autores mencionan haber encontrado una relación entre el retroceso de la CL y los periodos posteriores de separación de los remolinos, es decir, cuando la CL se retrae más hacia el sur se puede asociar con periodos de separación de remolinos más largos. Por ello se realizó una gráfica de los periodos de separación y la latitud de retraimiento de la CL (Figura 5.12, análoga a la Figura 3.3) y se obtuvo la línea de tendencia y el coeficiente de correlación.

Leben (2005) encontró que la relación era bastante marcada (ver Figura 3.3), pero en este análisis resultó que un coeficiente de correlación de 0.34. Así, se puede apuntar que esta relación no es una regla, sino más bien observaciones coincidentes que se tienen que estudiar o, en todo caso, confirmar cuando se cuente con datos más extensos.

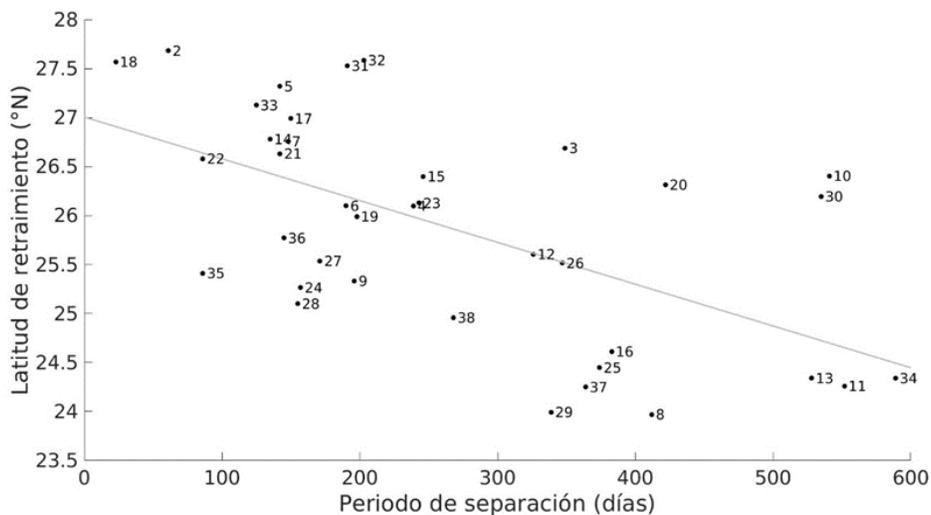


Figura 5.12. Diagrama de dispersión del periodo de separación de los remolinos (días) contra latitud de retraimiento (°N). Se indican el número del remolino correspondiente al periodo de separación y la latitud de retraimiento correspondiente al remolino anterior. La línea diagonal muestra la línea de tendencia, con coeficiente de correlación $R^2 = 0.3441$.

Por el otro lado, Alvera-Azcárate et al. (2009) también encontraron que existe una relación entre el diámetro de los remolinos y el periodo de separación, es decir, remolinos más grandes están asociados a periodos de separación más largos. La Figura 5.13 muestra la gráfica de dispersión del periodo de separación contra el diámetro del remolino anterior, con su línea de tendencia.

De manera general, los datos siguen la tendencia que los autores indicaron, con un coeficiente de correlación de 0.49. No obstante, existen datos donde no se cumplió la relación, poniendo como ejemplo que no todos los diámetros menores a 250 km corresponden a periodos de separación cortos posteriores, incluso el remolino número 26 se separó después de casi un año.

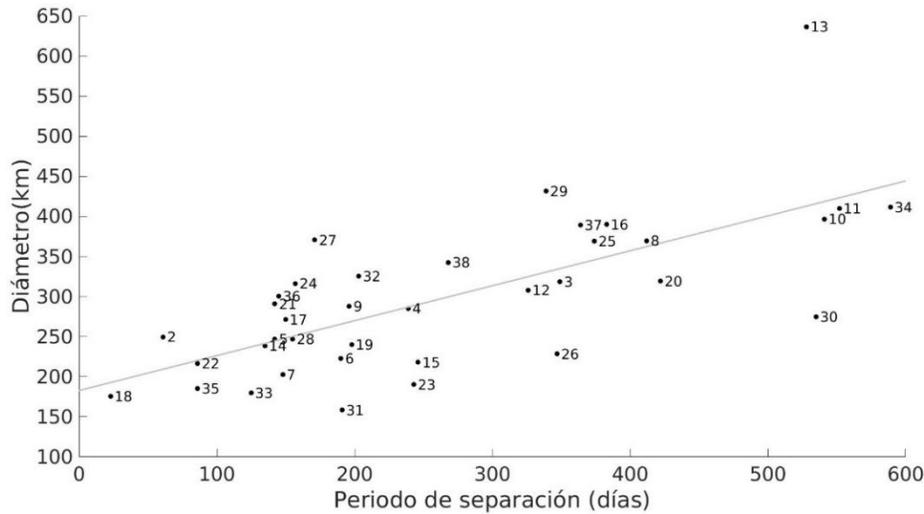


Figura 5.13. Diagrama de dispersión del periodo de separación (días) contra el diámetro de los remolinos (km). Se indican el número del remolino correspondiente al periodo de separación y el diámetro correspondiente al remolino anterior. La línea diagonal muestra la línea de tendencia, con coeficiente de correlación de $R^2 = 0.4913$.

Alvera-Azcárate et al. (2009) explicaron que las dos relaciones anteriores se asociaban al tamaño y penetración de la CL, es decir, los remolinos grandes son producto de una CL compacta y retraída bastante hacia el sur (cerca de Cuba), y de ahí se espera un periodo de separación más largo. De esta manera, también se realizó la gráfica de dispersión del diámetro de los remolinos y la latitud de retraimiento de la CL, para comprobar si los remolinos más grandes se separaron cuando la CL tuvo un mayor retroceso hacia el sur, y si los remolinos de menor tamaño se originaron cuando la CL tuvo mayor penetración (Figura 5.14).

Los datos siguieron la tendencia general, con un coeficiente de correlación de 0.44. Los cuatro remolinos mayores a 400 km están asociados a una latitud de retraimiento de la CL menor a 24.35°N (remolinos número 10, 12, 28 y 33), en tanto los remolinos más pequeños (<180 km) se separaron cuando la CL tuvo una latitud de retraimiento mayor a 27°N (remolinos número 17, 30 y 32).

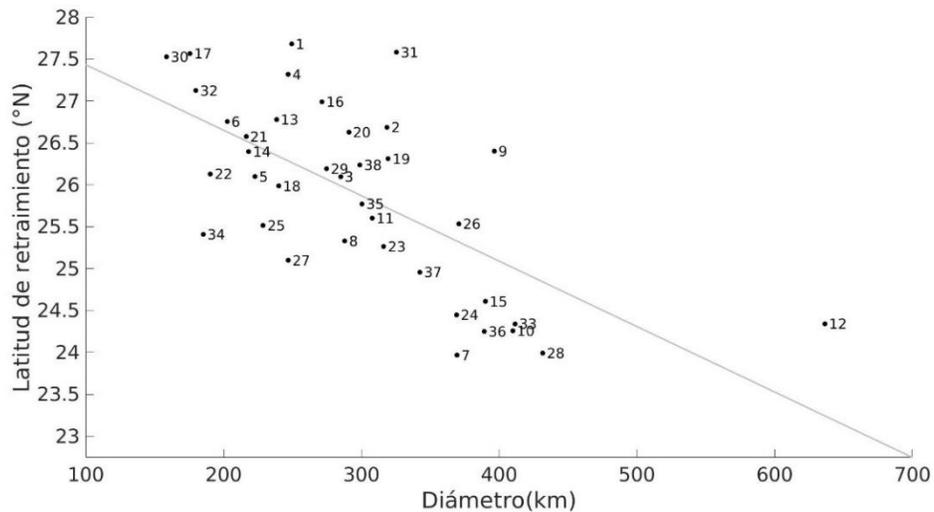


Figura 5.14. Diagrama de dispersión del diámetro de los remolinos (km) contra la latitud de retraimiento (°N). Se indican el número del remolino correspondiente al diámetro y a la latitud de retraimiento. La línea diagonal muestra la línea de tendencia, con coeficiente de correlación de $R^2 = 0.4451$.

En cuanto a la forma, solo se pudo apreciar en ciertos casos que los remolinos de menor diámetro se separan cuando la CL tiene una forma alargada y una gran penetración al norte (por ejemplo, los remolinos número 17 y 30, ver apéndice B), y que los remolinos de mayor tamaño se asocian a una CL compacta y bastante retraída (por ejemplo, los remolino número 12 y 33, ver apéndice B).

En las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se observa que las relaciones descritas por Leben (2005) y Alvera-Azcárate et al. (2009) se verifican de manera general, pero con variaciones importantes, lo que proporciona solamente un indicativo del comportamiento que podrían tener los RCL, más no una regla siempre a cumplir. Nuevamente se reitera la necesidad de contar con un registro más largo para poder asegurar si el comportamiento de los RCL es pronosticable, por lo menos de manera estadística.

5.2.1. Comparación con las observaciones

Los registros de los RCL obtenidos en este trabajo fueron comparados con el análisis de la base de datos de SSH-AVISO publicado por Hall y Leben (2016), en un lapso de enero de 1993 a diciembre de 2012. En la Tabla 5.5 se muestra la comparación de estos dos estudios en el periodo de análisis mencionado, del día y periodo de separación de los RCL.

Tabla 5.5. Comparación del día de separación y del periodo de separación de los Remolinos de la Corriente del Lazo obtenidos en este trabajo con los reportados por Hall y Leben (2016).

No.	Nombre industrial	Trabajo de tesis CMEMS ADT		Hall y Leben (2016) AVISO SSH		Diferencia de días
		Día de Separación	Periodo de separación	Día de separación	Periodo de separación	
1	Whopper	08-jul-1993	-	08-jul-1993	-	0
2	Xtra	07-sep-1993	61	04-sep-1993	58	3
3	Yucatan	22-ago-1994	349	19-ago-1994	349	3
4	Zapp	18-abr-1995	239	17-abr-1995	241	1
5	Aggie	07-sep-1995	142	01-sep-1995	137	6
6	Biloxi	15-mar-1996	190	08-mar-1996	189	7
7	Creole	10-ago-1996	148	20-jul-1996	134	21
8	El Dorado	26-sep-1997	412	25-sep-1997	432	1
9	Fourchon	10-abr-1998	196	12-feb-1998	140	57
10	Juggernaut	03-oct-1999	541	28-sep-1999	593	5
11	Millenium	07-abr-2001	552	29-mar-2001	548	9
12	Pelagic	27-feb-2002	326	24-feb-2002	332	3
-	Quick	-	-	-	-	-
13	Sargassum	09-ago-2003	528	11-ago-2003	533	-2
14	Titanic	22-dic-2003	135	20-dic-2003	131	2
15	Ulysses	24-ago-2004	246	19-ago-2004	243	5
16	Vortex	11-sep-2005	383	11-sep-2005	388	0
17	Walker	08-feb-2006	150	06-feb-2006	148	2
18	Xtreme	03-mar-2006	23	12-feb-2006	6	19
19	Yankee	17-sep-2006	198	15-sep-2006	215	2
20	Albert	13-nov-2007	422	21-oct-2007	401	23
21	Brazos	03-abr-2008	142	02-mar-2008	133	32
22	Cameron	28-jun-2008	86	27-jun-2008	117	1
23	Darwin	26-feb-2009	243	14-feb-2009	232	12
24	Ekman	02-ago-2009	157	22-jun-2009	128	41
25	Franklin	11-ago-2010	374	27-jun-2010	370	45
26	Hadal	24-jul-2011	347	22-jul-2011	390	2
27	Icarus	11-ene-2012	171	05-nov-2011	106	67
28	Jumbo	14-jun-2012	155	28-may-2012	205	17
	Media		256		256	14

En primer lugar, el número de los remolinos observados en ambos estudios son los mismos para el periodo de tiempo de 20 años de altimetría (28 remolinos). De hecho, Hall y Leben (2016) tampoco registraron el remolino Quick en el producto AVISO, e indican que, al igual que en los resultados propios (Figura 5.11), Pelagic y Quick se separan de la CL como un solo remolino, y se separan pocos días después. En segundo término, los remolinos tienen días de separación bastante cercanos. La mitad de los remolinos tienen una diferencia de la fecha de separación menor o igual a 5 días. La mayor diferencia es poco más de dos meses, y el promedio fue de 14 días. Y por último, los periodos de separación fueron semejantes, siendo que las medias tienen el mismo valor (256 días). El mínimo valor fue 23 días en este estudio y seis días en Hall y Leben (2016), refiriéndose al mismo remolino (remolino número 18). El máximo valor fue de 552 días en este trabajo (remolino número 11) y 593 días en Hall y Leben (2016) (remolino número 10).

En esta sección se proporcionó una comparación que resalta la eficacia de la metodología realizada para representar adecuadamente los eventos de separación de los RCL, por lo cual se puede seguir reproduciendo para el estudio continuo del SCL.

Capítulo 6

Variabilidad de las corrientes en superficie

En este capítulo se presentan los resultados de la segunda metodología referente al estudio de la variabilidad de las corrientes superficiales en las plataformas del Golfo de México, utilizando análisis espectral. El estudio de la variabilidad se realizó por medio de los siguientes aspectos: la forma del espectro, el contenido de energía espectral de los espectros, los periodos significativos y el sentido de giro de las corrientes. El contenido de la energía espectral se calcula a partir de la Potencia Total (PT) de los espectros, el cual permite identificar cuál componente de la velocidad tiene la mayor variabilidad o riqueza de componentes espectrales.

Este capítulo se divide en dos secciones. La primera sección abarca los resultados del análisis de Fourier, enfatizando la Potencia Total de las cuatro componentes de velocidad en los puntos seleccionados. La segunda sección comprende el análisis rotatorio de la velocidad, presentando los coeficientes rotatorios en los periodos significativos para los dieciocho puntos de evaluación.

Para facilidad de la discusión de resultados, los puntos seleccionados fueron agrupados de acuerdo con la plataforma en donde se encuentran. A cada punto de ambas isóbatas se les asignó un número siguiendo un orden en sentido antihorario, empezando por la zona noreste del Golfo, como se muestra en la Figura 6.1.

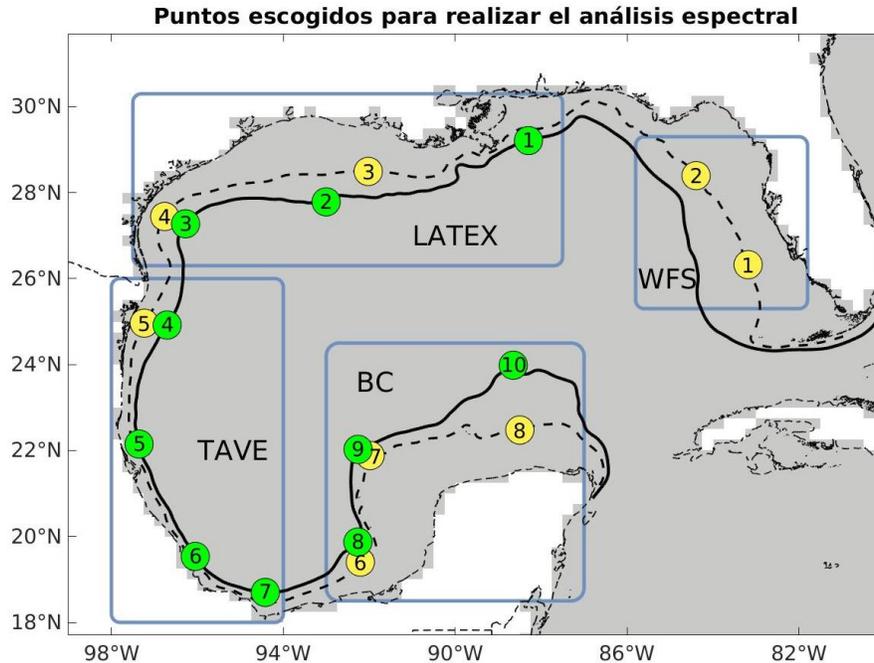


Figura 6.1. Puntos escogidos para el análisis espectral enumerados para la isóbata de los 50 m (puntos amarillos) y la isóbata de los 200 m (puntos verdes), agrupados de acuerdo con la plataforma continental en donde se encuentran.

6.1. Análisis de Fourier

En el análisis de Fourier, como se explicó en la metodología (sección 4.2.2), se obtuvieron los espectros de las componentes de velocidad del sistema cartesiano (u, v) y del sistema rotado (paralela, perpendicular) de los puntos seleccionados, a partir del método del periodograma. Por ello, en total suman 72 espectros a analizar, los cuales se pueden encontrar en el apéndice C.1.

A cada periodograma se le calculó la PT siguiendo la ecuación 4.16, valores que se encuentran en las Tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4, de acuerdo con la plataforma continental.

Tabla 6.1. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular de la plataforma *West Florida Shelf*.

Punto e isóbata	PT (m/s) ² x 10 ⁻³			
	<i>u</i>	<i>v</i>	Paralela	Perpendicular
Punto 1 50 m	1.21	4.34	4.30	1.24
Punto 2 50 m	2.04	4.19	4.57	1.66

Los puntos ubicados en la WFS (puntos 1 y 2 de la isóbata de 50 m) tienen los valores de PT más bajos en comparación con las demás plataformas continentales, (orden de $\sim 1-4 \times 10^{-3}$ (m/s)²). Para ambos puntos, los valores más altos resultan en la componente de velocidad meridional y paralela a la isóbata.

Tabla 6.2. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular de la plataforma Texas-Luisiana.

Punto e isóbata	PT (m/s) ² x 10 ⁻³			
	<i>u</i>	<i>v</i>	Paralela	Perpendicular
Punto 1 200 m	10.83	3.88	9.14	5.58
Punto 3 50 m	5.55	1.19	5.56	1.18
Punto 2 200 m	9.04	2.63	6.90	4.77
Punto 4 50 m	4.41	5.18	2.84	6.75
Punto 3 200 m	4.46	9.11	3.28	10.29

En la plataforma de LATEX, el punto número 1 de la plataforma de los 200 m, el que se encuentra adyacente a la desembocadura del Mississippi, tiene los valores más altos de PT en la componente zonal y la paralela. De hecho, la componente zonal de este punto es la que tiene el mayor valor de todas las componentes de los puntos encontrados en LATEX.

El punto 3 de la isóbata de 50 m y el punto 2 de la isóbata de los 200 m son ubicaciones cercanas (una se encuentra frente a la otra) y para ambos se encuentran los mayores valores en las

componentes zonal y paralela. Se puede notar en el punto 3 de la isóbata de 50 m que los valores son similares entre la componente zonal y paralela, y entre la meridional y perpendicular (con una diferencia de $0.01 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ para ambos casos), lo cual indica que las velocidades geostróficas rotaron poco para la creación del sistema rotado.

Por el otro lado, el punto 4 de la isóbata de los 50 m y el punto 3 de la isóbata de los 200 m, que de igual manera se ubican cercanamente, los mayores valores están en las componentes meridional y perpendicular. Cercanos a estos puntos se encuentra una zona de confluencia (ver Figura 3.10), por lo cual están situados en una región con alta variabilidad.

Tabla 6.3. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular de la plataforma Tamaulipas-Veracruz.

Punto e isóbata	PT (m/s) ² x 10 ⁻³			
	<i>u</i>	<i>v</i>	Paralela	Perpendicular
Punto 5 50 m	4.28	20.68	9.10	15.86
Punto 4 200 m	11.87	32.66	11.84	32.69
Punto 5 200 m	4.45	34.11	28.53	10.03
Punto 6 200 m	7.88	9.04	3.55	13.37
Punto 7 200 m	17.48	4.97	17.64	4.81

En la plataforma TAVE, el punto 5 de la isóbata de los 50 m y el punto 4 de la isóbata de los 200 m son contiguos (97.23°W , 24.96°N y 96.70°W , 24.92°N , respectivamente), y ambos muestran los mayores valores en la componente meridional y perpendicular.

En particular, el punto 4 de la isóbata de los 200 m contiene la mayor energía espectral en comparación con los 17 puntos restantes, superando una PT de $44 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ en los sistemas coordenados. Esto se debe a que los RCL chocan, interactúan y se disipan en esa zona y, al ubicarse el punto en el quiebre de la plataforma, éste tiene una mayor variabilidad que el punto cercano ubicado en una isóbata de menor profundidad.

Ubicado frente a la costa de Veracruz-Tamaulipas, el punto 5 de la isóbata de 200 m tiene sus mayores valores en la componente meridional y la paralela, siendo el segundo punto que contó con mayor energía espectral ($\sim 38 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ de PT en los sistemas coordenados).

El punto 6 de los 200 m, colocado frente a Veracruz (96.05°W , 19.53°N), alcanza sus valores más altos en la componente meridional y perpendicular.

Y por último en esta plataforma, el punto 7 de los 200 m, situado frente Veracruz-Tabasco, tiene sus mayores valores en la componente zonal y la componente paralela. Este punto se ubica en la otra zona de confluencia (ver Figura 3.12), por lo cual su valor de PT ($\sim 22 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$) refleja una alta variabilidad.

Los valores de PT de los puntos en TAVE son los mayores en comparación con las demás plataformas, confirmando lo dicho en la sección 3.2.3, que en esta plataforma se encuentran las corrientes más fuertes y con mayor variabilidad.

Tabla 6.4. Potencia total de los espectros de las componentes de velocidad zonal, meridional, paralela y perpendicular del Banco de Campeche.

Punto e isóbata	PT (m/s) ² x 10 ⁻³			
	<i>u</i>	<i>v</i>	Paralela	Perpendicular
Punto 6 50 m	5.42	5.60	8.33	2.70
Punto 8 200 m	2.25	8.31	7.77	2.79
Punto 7 50 m	4.26	3.15	5.23	2.18
Punto 9 200 m	7.10	5.15	9.36	2.89
Punto 8 50 m	5.10	4.06	5.22	3.94
Punto 10 200 m	23.20	14.56	21.99	15.77

Para la última plataforma, el BC, se escogieron tres puntos en la isóbata de los 50 m y tres en la isóbata de los 200 m. Cada punto de la primera isóbata se encuentra frente a un punto de la segunda isóbata, para poder realizar una comparación entre ambas batimetrías locales.

En el punto 6 de la isóbata de los 50 m y en el punto 8 de la isóbata de los 200 m (92.21°W , 19.40°N y 92.26°W , 19.87°N respectivamente), los valores más altos de PT se encuentran en la componente meridional y la paralela.

Por otra parte, en el punto 7 de la isóbata de los 50 m y el punto 9 de la isóbata de los 200 m (91.98°W , 21.88°W y 92.26°W , 22.03°N respectivamente), los valores máximos están en la componente zonal y la paralela.

Por último, los últimos puntos de ambas isóbatas (8 y 10) alcanzaron mayores valores en la componente zonal y paralela. No obstante, el punto 10 de la isóbata de 200 m presenta valores más altos de PT en comparación con el punto 8 de la isóbata de 50 m, siendo el tercer punto con mayor energía espectral. La razón de una mayor energía en este último punto se debe a que la CL llega a pasar en esa zona en su recorrido en el Golfo de México, por lo cual es una región con mucha variabilidad.

En conclusión, el análisis de la variabilidad indica que en 13 de los 18 puntos la circulación predominante en el Golfo de México es paralela a las isóbatas. El o los mecanismos responsables de la predominación de las corrientes a lo largo de las isóbatas pueden ser, por ejemplo, el forzamiento del esfuerzo del viento (como se discutió en la sección 3.2), o las ondas topográficas subinerciales, las cuales viajan a lo largo de la costa con agua somera a la derecha (izquierda) en el Hemisferio Norte (Sur) y están asociadas con la conservación de la vorticidad potencial (Zavala-Sansón, 2012).

Los cinco puntos que tienen valores más altos de PT en la componente perpendicular son los puntos 4 y 5 de la isóbata de 50 m, y los puntos 3, 4, 6 de la isóbata de 200 m. Estos puntos de evaluación se encuentran en regiones con una gran actividad de submesoescala, influencia por la descarga de ríos, entre otros, lo que produce corrientes oceánicas con alta variabilidad espacial y temporal que se refleja en una gran cantidad de energía espectral. Dos de estos puntos se encuentran en la plataforma LATEX en el borde de TAVE (punto 4 de la isóbata de 50 m y punto 3 de la isóbata de 200 m), en donde sus isóbatas realizan un cambio de ángulo. Los otros tres se encuentran en la plataforma TAVE, donde dos de ellos (punto 5 de la isóbata de 50 m y punto 4 de la isóbata de 200 m) se ubican en la zona donde los RCL impactan; el otro punto, el 6 de la isóbata de 200

m, también se encuentra en una isóbata con un ángulo ligero, y tiene una gran diferencia entre las dos componentes del sistema rotado (diferencia de $\sim 9.8 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ de PT). Un análisis más detallado de los distintos procesos asociados a este comportamiento merece un estudio más profundo, que está más allá del alcance de esta tesis y se deja para estudios posteriores.

6.2. Análisis rotatorio

En este segundo análisis espectral se obtuvieron los espectros rotatorios de la velocidad en el sistema rotado para los 18 puntos seleccionados, siguiendo las ecuaciones 4.34 y 4.35. Las gráficas de los espectros resultantes se encuentran en el apéndice C.2.

Por cada punto, se escogieron periodos de interés que representaban picos en los espectros rotatorios y, a partir de éstos, se calcularon los coeficientes rotatorios r dada la ecuación 4.41, enfatizando el sentido de la rotación según la ecuación 4.42. Los valores de r que tuvieran un orden iguales o menores de 10^{-2} se consideraron “casi lineales”. Por último, a las dos componentes rotatorias de cada punto (horaria y antihoraria) se le calcularon las PT con las ecuaciones 4.39 y 4.40. Todos estos valores mencionados se encuentran en la Tabla 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8, agrupados de acuerdo con la plataforma continental en que se encuentran los puntos.

Tabla 6.5. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en la plataforma *West Florida Shelf*.

Punto e isóbata	Periodos significativos (días)	Coeficiente rotatorio r	Sentido de rotación	PT (m/s) ² x 10 ⁻³	
				Componente horaria	Componente antihoraria
Punto 1 50 m	271	0.02	Casi lineal		
	371 (anual)	0.23	Antihorario	3.28	3.52
	668	0.37	Antihorario		
Punto 2 50 m	182 (semianual)	-0.22	Horario		
	271	-0.12	Horario		
	323	-0.27	Horario	3.87	3.77
	358 (anual)	-0.51	Horario		

Las dos componentes de rotación opuesta en los puntos de la plataforma WFS son los que cuentan con valores más bajos de PT, como sucedió en el análisis de Fourier. Estos puntos tienen espectros rotatorios con más ruido a comparación de la mayoría de los puntos restantes (Figura C.3), aunque sí se distinguieron los periodos de interés en ambos.

Para los tres periodos de interés del punto 1 (271, 371 y 668 días) los valores de coeficientes rotatorios tienen un sentido de rotación antihorario, aunque el primero, el del periodo de 9 meses, se consideró casi lineal dado que su valor de r fue cercano a 0. El periodo de 668 días podría estar asociado a distintos fenómenos atmosféricos.

En el punto 2 se encontraron cuatro periodos de interés: 182, 271, 323 y 358 días, los cuales tienen coeficientes rotatorios negativos, es decir, su rotación fue en sentido horario.

Tabla 6.6. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en la plataforma Texas-Luisiana.

Punto e isóbata	Periodos significativos (días)	Coeficiente rotatorio r	Sentido de rotación	PT (m/s) ² x 10 ⁻³	
				Componente horaria	Componente antihoraria
Punto 1 200 m	182 (semianual)	-0.13	Horario	9.79	8.25
	122	0.36	Antihorario		
Punto 3 50 m	182 (semianual)	0.39	Antihorario	4.12	4.15
	371 (anual)	-0.57	Horario		
Punto 4 50 m	122	-0.50	Horario		
	182 (semianual)	0.22	Antihorario	5.76	6.00
	371 (anual)	-0.17	Horario		
Punto 2 200 m	182 (semianual)	-0.03	Casi lineal		
	436	-0.22	Horario	7.94	6.38
	626	0.00	Lineal		
Punto 3 200 m	182 (semianual)	0.01	Casi lineal	8.74	7.91

En la plataforma LATEX, el punto 1 de los 200 m, el que se encuentra en las cercanías del delta del Mississippi, el único periodo de interés es a los 182 días con un sentido de rotación horario.

Para los dos puntos de la isóbata de los 50 m en la plataforma LATEX (punto 3 y 4) se encuentran periodos de interés a los 122, 182 y 371 días. En el primer periodo el sentido de rotación difiere en los dos puntos, siendo antihorario para el punto 3 y horario para el punto 4. En el caso de los otros dos periodos, los sentidos de rotación en ambos puntos son los mismos: antihorario y horario, respectivamente.

En el caso de los otros dos puntos ubicados en la zona de los 200 m (punto 2 y 3), coinciden en un periodo de interés, el de 182 días, en el cual se halla un valor de r muy pequeño, por lo cual el sentido de rotación fue casi lineal.

Específicamente, para el punto 2 se tienen aparte dos periodos de interés que superaron el periodo anual: 436 y 626 días. En el periodo de 436 días el coeficiente rotatorio es negativo, lo que resulta en un sentido horario. Para el segundo periodo, el de 626 días, el valor de r es el de menor magnitud de todos los coeficientes rotatorios calculados, siendo -0.0039 que se redondea a 0, lo que deriva en ser el único periodo de interés de todos los puntos con un sentido estrictamente unidireccional.

Tabla 6.7. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en la plataforma Tamaulipas-Veracruz.

Punto e isóbata	Periodos significativos (días)	Coeficiente rotatorio r	Sentido de rotación	PT (m/s) ² x 10 ⁻³	
				Componente horaria	Componente antihoraria
Punto 5 50 m	182 (semianual)	-0.22	Horario	15.84	14.78
	371	-0.05	Casi lineal		
Punto 4 200 m	182 (semianual)	-0.09	Casi lineal	25.34	29.28
	371 (anual)	0.16	Antihorario		
Punto 5 200 m	182 (semianual)	-0.10	Horario	23.00	24.31
	371 (anual)	0.09	Casi lineal		

Punto 6	271	-0.17	Horario		
200 m	371 (anual)	0.16	Antihorario	10.68	10.08
Punto 7	182 (semianual)	0.18	Antihorario		
200 m	371 (anual)	0.37	Antihorario	12.80	14.75

En la plataforma TAVE, en el único punto ubicado en la isóbata de los 50 m (el punto 5) se distinguen dos periodos de interés, uno a los 182 días con una rotación horaria, y el otro a los 371 días con un movimiento casi lineal. De igual manera, el punto contiguo a éste, el punto 4 de la isóbata de los 200 m, tiene también los mismos periodos de interés, pero con sentido de rotación diferente: para el periodo de 182 días el movimiento es casi lineal, en tanto que para el periodo de 371 días el sentido es antihorario.

El punto 5 de la isóbata de 200 m presenta los mismos dos periodos de interés, con la diferencia que para el primero el sentido es horario, y para el segundo el movimiento es casi lineal.

El punto 6, nuevamente de la isóbata de 200 m, presenta dos periodos de interés, uno a los 271 días y otro a los 371 días, con un sentido horario y antihorario respectivamente.

El último punto de la plataforma TAVE, el punto 7 de la isóbata de los 200 m, tiene periodos de interés a los 182 y 371 días, con un sentido de rotación antihorario para ambos.

En esta plataforma nuevamente se hallan los máximos valores de PT con respecto a las demás plataformas, siendo el punto 4 y el 5 de la isóbata de los 200 los que tienen mayor energía espectral.

Tabla 6.8. Análisis rotatorio de la velocidad en los puntos de evaluación en el Banco de Campeche.

Punto e isóbata	Periodo significativos (días)	Coeficiente rotatorio r	Sentido de rotación	PT (m/s) ² x 10 ⁻³	
				Componente horaria	Componente antihoraria
Punto 6 50 m	122	-0.02	Casi lineal		
	182 (semianual)	-0.43	Horario	7.54	5.99
	371 (anual)	-0.23	Horario		

Punto 8 200 m	122	-0.46	Horario	7.37	5.59
	182 (semianual)	-0.32	Horario		
	371 (anual)	-0.46	Horario		
Punto 7 50 m	127	-0.70	Horario	5.23	3.86
	182 (semianual)	-0.48	Horario		
	371 (anual)	-0.46	Horario		
Punto 9 200 m	127	-0.62	Horario	8.43	6.60
	182 (semianual)	-0.23	Horario		
	371 (anual)	-0.76	Horario		
Punto 8 50 m	182 (semianual)	-0.48	Horario	4.99	6.24
	371 (anual)	-0.02	Casi lineal		
Punto 10 200 m	Sin periodos representativos			17.82	28.49

En el BC el último punto de la isóbata de los 200 m (punto 10) cuenta con mucho ruido en su espectro rotatorio, es decir que contaba con varios picos (ver Figura C.4), por lo cual no se logra distinguir ningún periodo de interés. Esto es porque, como se explicó en la discusión de la Tabla 6.4, en este punto la CL tiende a pasar cuando penetra en el Golfo de México, generando una mayor variabilidad que se refleja en valores altos de PT de las componentes de rotación opuesta (sumando $46.31 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$).

Fuera del último punto de la isóbata de 200 m, todos los puntos de BC tienen periodos de interés asociados a valores de coeficientes rotatorios negativos, lo que indica un sentido de rotación horario, exceptuando en el periodo de 122 días del punto 6 y en el periodo anual del punto 8 de la isóbata de los 50 m, donde los valores son cercanos a cero y, por lo tanto, se consideran que tiene un movimiento casi lineal.

Los puntos 6 y 7 de la isóbata de 50 m, y los puntos 8 y 9 de la isóbata de 200 m cuentan con tres periodos de interés cada uno, los cuales son el periodo de 4 meses, el de 6 meses y el anual. El último punto de la isóbata de 50 m, el 8, solo tiene el periodo semianual y el anual.

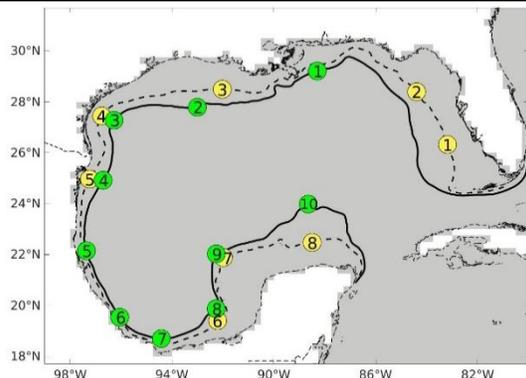
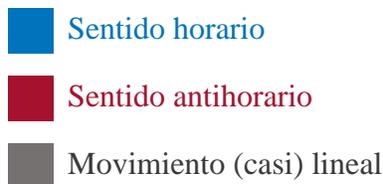
En esta plataforma se reflejan las magnitudes de coeficiente rotatorio mayores, encontrándose en el periodo de 127 días del punto 7 de la isóbata 50 m ($r = -0.70$), y en el periodo anual del último punto de la isóbata de 50 m ($r = 0.76$).

De este análisis rotatorio se deriva que las corrientes de las plataformas continentales del Golfo de México rotan usualmente en periodos característicos de 6 meses (182 días) y 12 meses (de 358 a 371 días), como se representa en la Tabla 6.9, lo que indica que la escala de tiempo semianual y anual son las características más energéticas del espectro.

De esta misma tabla se nota que las rotaciones más usuales en los puntos seleccionados son en sentido horario, sobre todo en la isóbata de los 50 m. Un análisis interesante se puede derivar escogiendo más puntos a analizar espectralmente, y en diferentes isóbatas, para poder observar que patrones de rotación se encuentran.

Tabla 6.9. Sentido de rotación de la velocidad en los periodos significativos de los puntos seleccionados, agrupados de acuerdo con la isóbata en donde se ubican.

Periodo (días)	Isóbata 50 m								Isóbata 200 m									
	WFS		LATEX		TA VE	BC			LATEX			TAVE				WFS		
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
122 – 127			■	■		■	■										■	■
182		■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
271	■													■				
323																		
358 – 371	■	■	■	■	■	■	■	■				■	■	■	■	■	■	
436									■	■								
626									■	■								
668	■																	



Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo de tesis se analizaron dos aspectos de la circulación oceánica superficial del Golfo de México: el Sistema de la Corriente del Lazo y las corrientes en las plataformas continentales. Para ambos estudios se utilizaron datos de altimetría satelital del producto CMEMS en un lapso de 27 años (del primer día de 1993 al 06 de junio del 2020).

En el primer estudio se destacó la importancia de la altimetría satelital como una técnica para la detección y monitoreo continuo del Sistema de la Corriente del Lazo, ya que ésta determina los fenómenos oceánicos que suceden en el Golfo de México a diferentes escalas. El contorno ADT-17 cm fue el utilizado para monitorear al Sistema de la Corriente de Lazo, debido a que funciona como proxy de la ubicación de la corriente y de sus remolinos, el cual se registra a cada paso temporal y permite el cálculo de diversas métricas de la Corriente del Lazo y de los Remolinos de la Corriente del Lazo.

En este trabajo se escribió un código numérico que calcula las métricas del Sistema de la Corriente del Lazo, y los resultados se compararon con aquellos reportados en la literatura científica, siendo consistentes para ambos casos. Las métricas de la Corriente del Lazo obtenidas en este trabajo de tesis son parecidas a las publicadas por Leben (2005), con excepción de la métrica de circulación, la cual resultó ser más variable porcentualmente. Para las métricas de los Remolinos de la Corriente del Lazo se realizó una base de datos de los eventos de separación, la cual fue comparada con la publicada por Hall y Leben (2016), comparación que presentó resultados similares tanto en fechas de separación como en número de remolinos registrados. Estos resultados muestran que la metodología llevada a cabo para el monitoreo del Sistema de la Corriente del Lazo

es robusta y puede seguir utilizándose para estudios del Sistema de la Corriente del Lazo. De hecho, esta metodología se utilizó en la validación del modelo HYCOM como parte del proyecto UNAM-PAPIIT IA104320 coordinado por el ICML-UNAM.

Actualmente, está en proceso la creación de un repositorio abierto en UNINMAR del ICML de la UNAM para que los datos del monitoreo del Sistema de la Corriente del Lazo se distribuyan ahí, así como la implementación de esta metodología en el sistema de pronóstico de la circulación oceánica en el Golfo de México desarrollado por el grupo IOA-ICAYCC de la UNAM.

En el segundo estudio se cuantificó la variabilidad de las corrientes en las plataformas continentales del Golfo de México, utilizando análisis de Fourier y espectros rotatorios en dieciocho puntos colocados a lo largo de las isóbatas de 50 y 200 m. Se obtuvieron los espectros de las componentes de velocidad del sistema cartesiano (componente zonal y meridional) y del sistema rotado (componente paralela y perpendicular a la isóbata), y se calcularon sus respectivas Potencias Totales a partir de los periodogramas. El análisis rotatorio en el sistema rotado se utilizó para revelar la energía espectral contenida en la componente paralela y perpendicular a la isóbata, y con ello identificar los periodos dominantes y sus correspondientes coeficientes rotatorios. Los resultados de los análisis espectrales son consistentes con los estudios de la circulación en las plataformas continentales del Golfo de México, ya que reflejaron que la componente paralela a la isóbata, de manera general, tiene mayor energía espectral en comparación con la componente perpendicular; el mecanismo de este fenómeno no se discute en este trabajo, por lo cual se deja para estudios posteriores. Los resultados mostraron también que la plataforma de Tamaulipas-Veracruz tiene las corrientes más intensas y variables en comparación con el resto de las plataformas en el Golfo. Los periodos dominantes de las corrientes en las plataformas son el periodo semianual y el anual.

Este estudio puede continuarse realizando como un trabajo futuro con diferentes consideraciones, tales como: considerar otros puntos a analizar y en diferentes plataformas, incorporar un análisis dinámico, así como analizar procesos asociados considerando toda la columna de agua, y no solo en superficie.

Referencias

- Allende-Arandía, M. E., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Vargas-Hernández, J. M., y Zamudio, L. (2016). Analysis of Ocean Current Observations in the Northern Veracruz Coral Reef System, Mexico: 2007–12. *Journal of Coastal Research*, 32(1), 46-55. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00148.1>
- Alvera-Azcárate, A., Barth, A., y Weisberg, R. H. (2009). The Surface Circulation of the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico as Inferred from Satellite Altimetry. *Journal of Physical Oceanography*, 39(3), 640-657. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3765.1>
- Apel, J. R. (1987). *Principles of Ocean Physics*. Academic Press.
- Arbic, B. K., Scott, R. B., Chelton, D. B., Richman, J. G., y Shriver, J. F. (2012). Effects of stencil width on surface ocean geostrophic velocity and vorticity estimation from gridded satellite altimeter data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C3). <https://doi.org/10.1029/2011JC007367>
- Athié, G., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J., Pérez-Brunius, P., y Romero-Arteaga, A. (2020). Seasonal Variability of the Transport through the Yucatan Channel from Observations. *Journal of Physical Oceanography*, 50(2), 343-360. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0269.1>
- AVISO. (2011). *AVISO_L4_DYN_TOPO_IDEG_IMO. Ver. 1. PO.DAAC, CA, USA* [Archivo PDF]. https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/aviso/L4/dynamic_topo_1deg_1mo/docs/zosTechNote_AVISO_L4_199210-201012.pdf
- Biggs, D. C., Jochens, A. E., Howard, M. K., DiMarco, S. F., Mullin, K. D., Leben, R. R., Müller-Karger, F. E., y Hu, C. (2005). Eddy Forced Variations in On-and Off-Margin Summertime Circulation Along the 1000-m Isobath of the Northern Gulf of Mexico, 2000-2003, and Links With Sperm Whale Distributions Along the Middle Slope. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 75-85). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM06>

- Biggs, D. C., y Müller-Karger, F. E. (1994). Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C4), 7371-7384. <https://doi.org/10.1029/93JC02153>
- Bunge, L., Ochoa, J., Badan, A., Candela, J., y Sheinbaum, J. (2002). Deep flows in the Yucatan Channel and their relation to changes in the Loop Current extension. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C12), 26-1-26-7. <https://doi.org/10.1029/2001JC001256>
- Candela, J., Tanahara, S., Crepon, M., Barnier, B., y Sheinbaum, J. (2003). Yucatan Channel flow: Observations versus CLIPPER ATL6 and MERCATOR PAM models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12). 15-1-15-23 <https://doi.org/10.1029/2003JC001961>
- Carrillo, G. J. (2003). *Fundamentos del análisis de Fourier*. Universidad de Vigo. http://grupo_ene.webs.uvigo.es/wordpress/publicaciones/Apuntes_Fourier.pdf
- Chang, Y. L., y Oey, L. Y. (2012). Why does the Loop Current tend to shed more eddies in summer and winter? *Geophysical Research Letters*, 39(5). 1-7. <https://doi.org/10.1029/2011GL050773>
- Chelton, D. B., Ries, J. C., Haines, B. J., Fu, L. L., y Callahan, P. S. (2001). Satellite altimetry. En Fu, L. L., y Cazenave, A. (Eds.). *Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications* (pp. 1-131). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(01\)80146-7](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(01)80146-7)
- Cho, K., Reid, R. O., y Nowlin Jr, W. D. (1998). Objectively mapped stream function fields on the Texas-Louisiana shelf based on 32 months of moored current meter data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C5), 10377-10390. <https://doi.org/10.1029/98JC00099>
- Cochrane, J. D., y Kelly, F. J. (1986). Low-frequency circulation on the Texas-Louisiana continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C9), 10645-10659. <https://doi.org/10.1029/JC091iC09p10645>
- Darnell, R. M., y Defenbaugh, R. E. (1990). Gulf of Mexico: Environmental Overview and History of Environmental Research. *American Zoologist*, 30(1), 3-6. <https://doi.org/10.1093/icb/30.1.3>
- DiMarco, S. F., Nowlin, W. D., y Reid, R. O. (2005). A Statistical Description of the Velocity Fields From Upper Ocean Drifters in the Gulf Of Mexico. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 101-110). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM08>
- Dubranna, J., Pérez-Brunius, P., López, M., y Candela, J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C8). 1-17. <https://doi.org/10.1029/2011JC007007>

- Dukhovskoy, D. S., Leben, R. R., Chassignet, E. P., Hall, C. A., Morey, S. L., y Nedbor-Gross, R. (2015). Characterization of the uncertainty of loop current metrics using a multidecadal numerical simulation and altimeter observations. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 100, 140-158. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.01.005>
- Elliott, B. A. (1982). Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 12(11), 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)
- Ellis, J. T., y Dean, B. J. (2012). Gulf of Mexico processes. *Journal of Coastal Research*, 60, 6-13. https://doi.org/10.2112/SI_60_2
- Expósito-Díaz, G., Salas-de León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., Salas-Monreal, D., y Vázquez-Gutiérrez, F. (2009). Inertial currents in the southern Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 35(3), 287-296. <https://doi.org/10.7773/cm.v35i3.1407>
- Ezer, T., Oey, L. Y., Lee, H. C., y Sturges, W. (2003). The variability of currents in the Yucatan Channel: Analysis of results from a numerical ocean model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C1). <https://doi.org/10.1029/2002JC001509>
- Forristall, G. Z., Schaudt, K. J., y Cooper, C. K. (1992). Evolution and Kinematics of a Loop Current Eddy in the Gulf of Mexico During 1985. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C2), 2173-2184. <https://doi.org/10.1029/91JC02905>
- Fratantoni, P. S., Lee, T. N., Podesta, G. P., y Müller-Karger, F. (1998). The influence of Loop Current perturbations on the formation and evolution of Tortugas eddies in the southern Straits of Florida. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11), 24759-24779. <https://doi.org/10.1029/98JC02147>
- Fu, L. L. (2010). Determining Ocean Circulation and Sea Level from Satellite Altimetry: Progress and Challenges. En *Oceanography from space: Revisited* (pp. 147-163). Springer Science & Business Media. DOI: 10.1007/978-90-481-8681-5_9
- Gelfenbaum G. (2005). Coastal Currents. In: Schwartz M.L. (eds) *Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Science Series*. Springer, Dordrecht. 216-356 https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_78
- Hall, C. A., y Leben, R. R. (2016). Observational evidence of seasonality in the timing of loop current eddy separation. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76, 240-267. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2016.06.002>
- Hamilton, P., Berger, T. J., Singer, J. J. Waddell E., Churchill, J. H., Leben, R. R., Lee, T. N., y Sturges, W. (2000). *Desoto Canyon Eddy Intrusion Study, Final Report, Volume II: Technical Report*. OCS Study MMS 2000-080. U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA.
- Hamilton, P., y Lee, T. N. (2005). Eddies and jets over the slope of the northeast Gulf of Mexico. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico*:

- Observations and Models* (pp. 123-142). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM010>
- Hamilton, P., Lugo-Fernández, A., y Sheinbaum, J. (2016). A Loop Current experiment: Field and remote measurements. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76, 156-173. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2016.01.005>
- Hayashi, Y. (1979). Space-Time Spectral Analysis of Rotary Vector Series. *Journal of Atmospheric Sciences*, 36(5), 757-766. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1979\)036<0757:STSAOR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<0757:STSAOR>2.0.CO;2)
- He, R., y Weisberg, R. H. (2003a). A Loop Current Intrusion Case Study on the West Florida Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 33(2), 465-477. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0465:ALCICS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0465:ALCICS>2.0.CO;2)
- He, R., y Weisberg, R. H. (2003b). West Florida shelf circulation and temperature budget for the 1998 fall transition. *Continental Shelf Research*, 23(8), 777-800. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(03\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(03)00028-1)
- Hosansky, D. (28 de febrero de 2011). *What happened to the oil?* NCAR and UCAR News. <https://news.ucar.edu/3968/what-happened-oil>
- Jarosz, E., y Murray, S. P. (2005). Velocity and Transport Characteristics of the Louisiana-Texas Coastal Current. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 143-156). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM11>
- Kirwan Jr, A. D., Merrell Jr, W. J., Lewis, J. K., y Whitaker, R. E. (1984). Lagrangian observations of an anticyclonic ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C3), 3417-3424. <https://doi.org/10.1029/JC089iC03p03417>
- Langton, C., y Levin, V. (2016). *The Intuitive Guide to Fourier Analysis and Spectral Estimation*. Mountcastle Company.
- Leben, R. R., Born G. H. y Engebret B. R. (2002). Operational altimeter data processing for mesoscale monitoring. *Marine Geodesy*, 25, 3-18. <https://doi.org/10.1080/014904102753516697>
- Leben, R. R. (2005). Altimeter-Derived Loop Current Metrics. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 181-201). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM15>
- Lee, H. C., y Mellor, G. L. (2003). Numerical simulation of the Gulf Stream System: The Loop Current and the deep circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C2). 25-1-25-16. <https://doi.org/10.1029/2001JC001074>

- Lee, T. N., Leaman, K., Williams, E., Berger, T., y Atkinson, L. (1995). Florida Current meanders and gyre formation in the southern Straits of Florida. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C5), 8607-8620. <https://doi.org/10.1029/94JC02795>
- Lewis, J. K., Kirwan Jr, A. D., y Forristall, G. Z. (1989). Evolution of a warm-core ring in the Gulf of Mexico: Lagrangian observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C6), 8163-8178. <https://doi.org/10.1029/JC094iC06p08163>
- Liu, Y., y Weisberg, R. H. (2005). Momentum balance diagnoses for the West Florida Shelf. *Continental Shelf Research*, 25(17), 2054-2074. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.03.004>
- Martínez-López, B., y Zavala-Hidalgo, J. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 77(1-2), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.10.002>
- McNish, L. (05 de noviembre de 2018). *RASC Calgary Centre - Latitude and Longitude*. Recuperado de 03 de octubre del 2021 en <https://calgary.rasc.ca/latlong.htm>
- Molinari, R. L., y Mayer, D. A. (1982). Current Meter Observations on the Continental Slope at Two Sites in the Eastern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 12(12), 1480-1492. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<1480:CMOOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<1480:CMOOC>2.0.CO;2)
- Moretzsohn, F., Sánchez Chávez, J. A., y Tunnell Jr, J. W. (2015). Gulfbase: resource database for Gulf of Mexico Research. *World Wide Web electronic publication*.
- Morey, S. L., Zavala-Hidalgo, J., y O'Brien, J. J. (2005). The Seasonal Variability of Continental Shelf Circulation in the Northern and Western Gulf of Mexico From a High-Resolution Numerical Model. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 203-218). Geophysical Monograph Series 161. <https://doi.org/10.1029/161GM16>
- Müller-Karger, F. E., Smith, J. P., Werner S., Chen, R., Roffer, M., Liu, Y., Muhling, B., Lindo-Atichati, D., Lamkin, J., Cerdeira-Estrada, S., Enfield, D. B. (2015). Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, 134, 54-76. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.12.007>
- Murphy, S. J., Hurlburt, H. E., y O'Brien, J. J. (1999). The connectivity of eddy variability in the Caribbean Sea, the Gulf of Mexico, and the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C1), 1431-1453. <https://doi.org/10.1029/1998JC900010>
- National Oceanic and Atmospheric Administration – National Ocean Service. (2008). *Gulf of Mexico at a Glance*. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- National Oceanic and Atmospheric Administration – National Ocean Service. (26 de febrero de 2021). *How are satellites used to observe the ocean?* Recuperado el 19 de septiembre de 2021 de <https://oceanservice.noaa.gov/facts/satellites-ocean.html>

- Nowlin, W. D. Jr., Jochens, A.E., DiMarco, S.F., Reid, R.O. (2000). Physical oceanography. En: *Deepwater Gulf of Mexico Environmental and Socioeconomic Data Search and Synthesis. Narrative Report* (pp. 61–121). OCS Study MMS 2000–049. Gulf of Mexico OCS Regional Office. Minerals Management Service. U.S. Department of the Interior.
- Nowlin, W. D. Jr., Jochens, A. E., DiMarco, S. F., Reid, R. O., y Howard, M. K. (2005). Low Frequency Circulation Over the Texas-Louisiana Continental Shelf. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 219-240). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM17>
- Nowlin, W. D. Jr., Jochens, A. E., Reid, R. O., y DiMarco, S. F. (1998). *Texas-Louisiana Shelf Circulation and Transport Processes Study: Synthesis Report, Volume I (Tech. Rep.)*. New Orleans, Louisiana: OCS Study MMS 98-0035. U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region.
- Oey, L. Y. (1995). Eddy-and wind-forced shelf circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C5), 8621-8637. <https://doi.org/10.1029/95JC00785>
- Oey, L. Y. (1996). Simulation of Mesoscale Variability in the Gulf of Mexico: Sensitivity Studies, Comparison with Observations, and Trapped Wave Propagation. *Journal of physical Oceanography*, 26(2), 145-175. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0145:SOMVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0145:SOMVIT>2.0.CO;2)
- Oey, L. Y., Ezer, T., y Lee, H. C. (2005). Loop Current, Rings and Related Circulation in the Gulf of Mexico: A Review of Numerical Models and Future Challenges. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 31-56). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM04>
- Oey, L. Y., Lee, H. C., y Schmitz Jr, W. J. (2003). Effects of winds and Caribbean eddies on the frequency of Loop Current eddy shedding: A numerical model study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C10). 22-1-22-25. <https://doi.org/10.1029/2002JC001698>
- Ohlmann, J. C., Niiler, P. P., Fox, C. A., y Leben, R. 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>
- Pedlosky, J. (1987). *Geophysical fluid dynamics* (Vol. 710). Springer.
- Pérez-Brunius, P., García-Carrillo, P., Dubranna, J., Sheinbaum, J., y Candela, J. (2013). Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 85, 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.020>
- Peters, E. M., Zaragoza Álvarez, R. A., Herzka, Sharon Z., y Herguera García, J. C. (Eds.) (2021). Introducción. En S. Z. Herzka, R. A. Zaragoza Álvarez, E. M. Peters y G. Hernández

- Cárdenas. (Coord. Gral.). *Atlas de línea base ambiental del golfo de México*. Consorcio de Investigación del Golfo de México. <https://atlasigom.cicese.mx/es/dataset/libro-atlas-tomo-0>
- Richardson, P. L. (2005). Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(3-4), 429-463. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.11.001>
- Rio, M. H. (2010). Absolute Dynamic Topography from Altimetry: Status and Prospects in the Upcoming GOCE Era. En *Oceanography from space: Revisited* (pp. 165-180). Springer Science & Business Media. DOI:10.1007/978-90-481-8681-5_10
- Robinson, I. S. (2010). *Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography*. Springer Science & Business Media.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., y Osuna-Cañedo, J.P. (Eds.) (2021). Circulación oceánica y oleaje. En S. Z. Herzka, R. A. Zaragoza Álvarez, E. M. Peters y G. Hernández Cárdenas. (Coord. Gral.). *Atlas de línea base ambiental del golfo de México (tomo II)*, México: Consorcio de Investigación del Golfo de México. <https://atlasigom.cicese.mx/es/dataset/libro-atlas-tomo-2>
- Schmitz Jr, W. J., Biggs, D. C., Lugo-Fernandez, A., Oey, L. Y., y Sturges, W. (2005). A synopsis of the circulation in the Gulf of Mexico and on its continental margins. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 11-29). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM03>
- Smith W. H. (2010). The Marine Geoid and Satellite Altimetry. En *Oceanography from space: Revisited* (pp. 181-193). Springer Science & Business Media. DOI:10.1007/978-90-481-8681-5_11
- Smith, W. H., Strub, T., y Miller, L. (2008). First Coastal Altimetry Workshop: Cooperative Institute For Oceanographic Satellite Studies/National Oceanic And Atmospheric Administration Coastal Altimeter Workshop; 5–7 February 2008, Silver Spring, Maryland. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 89(40), 380. <https://doi.org/10.1029/2008EO400008>
- Sturges, W., y Blaha, J. P. (1976). A Western Boundary Current in the Gulf of Mexico. *Science*, 192(4237), 367-369. DOI: 10.1126/science.192.4237.367
- Sturges, W., y Leben, R. R. (2000). Frequency of Ring Separations from the Loop Current in the Gulf of Mexico: A Revised Estimate. *Journal of Physical Oceanography*, 30(7), 1814-1819. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<1814:FORSFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<1814:FORSFT>2.0.CO;2)
- Taburet, G., Sanchez-Roman, A., Ballarotta, M., Pujol, M. I., Legeais, J. F., Fournier, F., Faugere, Y., y Dibarboure, G. (2019). DUACS DT2018: 25 years of reprocessed sea level altimetry products. *Ocean Science*, 15(5), 1207-1224. <https://doi.org/10.5194/os-15-1207-2019>

- Talley, L. D. (2011). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. (6° ed). Academic press.
- Thomson, R. E., y Emery, W. J. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography*. (3° ed.). Elsevier
- Vázquez de la Cerda, A. M., Reid, R. O., DiMarco, S. F., y Jochens, A. E. (2005). Bay of Campeche circulation: An update. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 279-293). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM20>
- Vukovich, F. M. (1995). An updated evaluation of the Loop Current's eddy-shedding frequency. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C5), 8655-8659. <https://doi.org/10.1029/95JC00141>
- Vukovich, F. M. (2007). Climatology of Ocean Features in the Gulf of Mexico Using Satellite Remote Sensing Data. *Journal of Physical Oceanography*, 37(3), 689-707. <https://doi.org/10.1175/JPO2989.1>
- Vukovich, F. M., y Crissman, B. W. (1986). Aspects of warm rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C2), 2645-2660. <https://doi.org/10.1029/JC091iC02p02645>
- Vukovich, F. M., y Maul, G. A. (1985). Cyclonic eddies in the eastern Gulf of Mexico. *Journal of physical Oceanography*, 15(1), 105-117. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<0105:CEITEG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0105:CEITEG>2.0.CO;2)
- Wang, W., Nowlin Jr, W. D., y Reid, R. O. (1998). Analyzed Surface Meteorological Fields over the Northwestern Gulf of Mexico for 1992–94: Mean, Seasonal, and Monthly Patterns. *Monthly weather review*, 126(11), 2864-2883. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2864:ASMFOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2864:ASMFOT>2.0.CO;2)
- Weisberg, R. H., y He, R. (2003). Local and deep-ocean forcing contributions to anomalous water properties on the West Florida Shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C6). 15-1-15-16. <https://doi.org/10.1029/2002JC001407>
- Weisberg, R. H., He, R., Liu, Y., y Virmani, J. I. (2005). West Florida Shelf circulation on synoptic, seasonal, and inter-annual time scales. En Sturges, W., y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (pp. 325-347). Geophysical Monograph Series 161. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/161GM23>
- Yang, H., y Weisberg, R. H. (1999). Response of the West Florida Shelf circulation to climatological wind stress forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C3), 5301-5320. <https://doi.org/10.1029/1998JC900101>

- Yoskowitz, D., C. Leon, J. Gibeaut, B. Luper, M. Lopez, C. Santos, G. Sutton, and L. McKinney. (2013). *Gulf 360: State of the Gulf of Mexico*. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University-Corpus Christi, Texas.
- Zavala-Hidalgo, J. y Fernández-Eguiarte, A. (2006). Propuesta para la regionalización de los mares mexicanos desde el punto de vista de los procesos físicos: el caso del Golfo de México. En: Córdova, A., Rosete, F., Enríquez, G. y Fernández, B. *Ordenamiento ecológico marino: Visión temática de la regionalización* (pp. 21-32). INE
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., y O'Brien, J. 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(C12), 19-1-19-19. <https://doi.org/10.1029/2003JC001879>
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Morey, S. L., y Martínez-López, B. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmósfera*, 27(3), 317-334. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71119-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71119-1)
- Zavala-Sansón, L. (2012). Simple Models of Coastal-Trapped Waves Based on the Shape of the Bottom Topography. *Journal of physical oceanography*, 42(3), 420-429. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-053.1>
- Zavala-Sansón, L. (2019). Nonlinear and time-dependent equivalent-barotropic flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 871, 925–951. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.354>

Apéndice A

Producto CMEMS

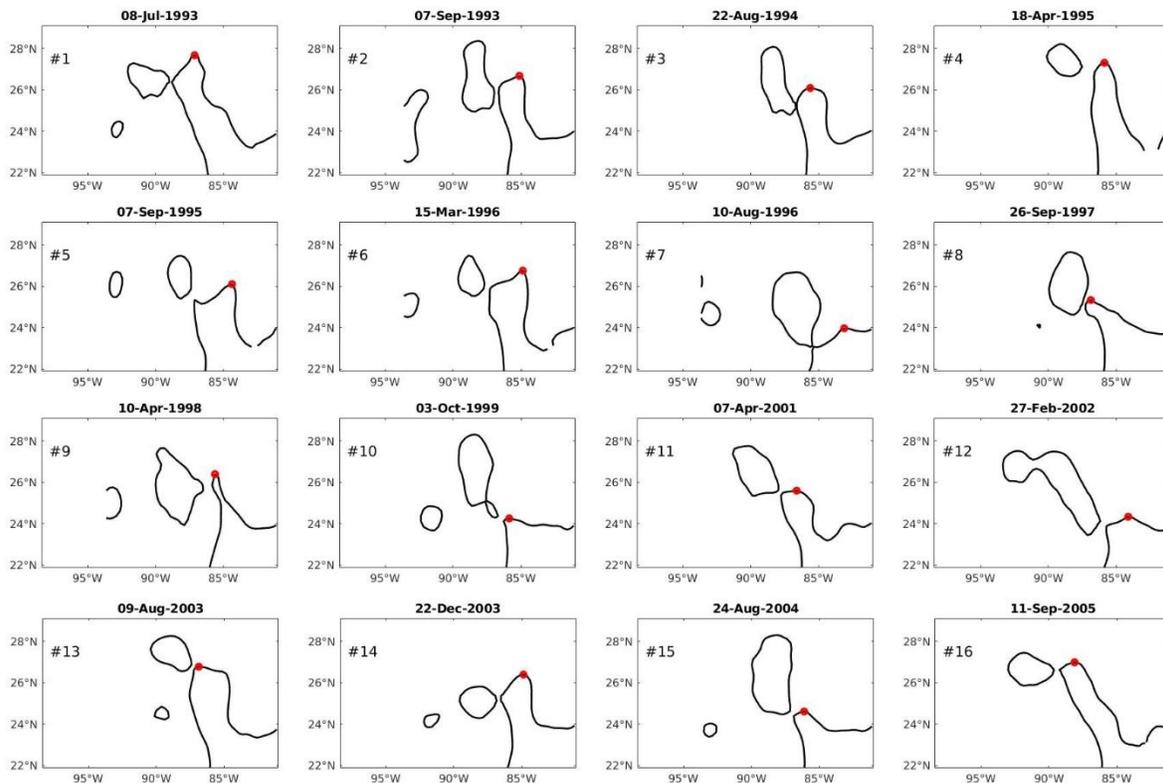
Al momento de la realización de los resultados, el producto CMEMS que se utilizó era el que se especificó en la metodología, el cual se encontraba en la página https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047 (último acceso, 2 de diciembre 2021). Sin embargo, este identificador de producto ya no existe en la página de Copernicus. Por ello se recurrió a ver los manuales de usuario de los productos de nivel del mar SLA: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SL-PUM-008-032-062.pdf> (manual de usuario anterior, el relacionado con el producto que se utilizó en la tesis) y <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-SL-PUM-008-032-068.pdf> (manual de usuario nuevo). Comparando los identificadores de producto, se puede distinguir que los productos NRT conservaron su nombre, pero que los productos *REP_OBSERVATIONS* cambiaron su identificador por *MY*. Éstos últimos hacen referencia a productos de tiempo rezagado o REP (por *REPROCESSING*) o, en el caso de la segunda, REP-MY (*Reprocessing/Multy-Year*).

El producto *MY*, con identificador *SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047* (ver página https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/INFORMATION, último acceso, 31 de enero 2022) corresponde la versión actualizada del producto que se utilizó en la tesis. Ambos productos son equivalentes, contienen la misma información que se explicó al principio del capítulo 4, con la diferencia del identificador utilizado para la interpolación óptima (*SEALEVEL*PHY_L3_MY_008**) y la cobertura temporal (la nueva abarca hasta el último día del 2020).

Apéndice B

Contornos de los Remolinos de la Corriente del Lazo

En este apéndice se muestran los contornos del SCL de los 38 eventos de separación del análisis de 27 años (1993-2020), indicándose la fecha de separación, el número del RCL y la latitud de retraimiento de la CL (asteriscos rojos).



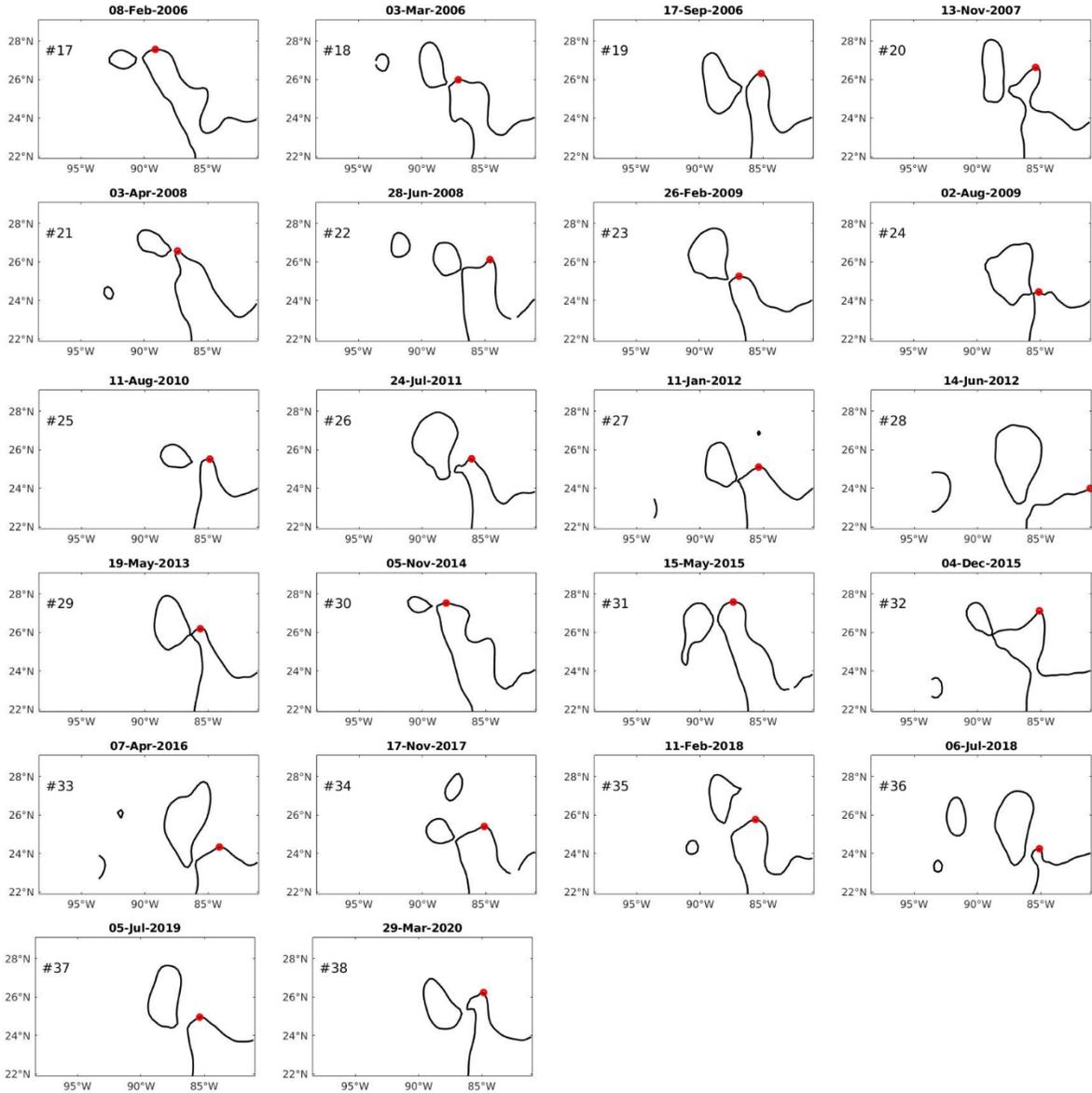


Figura B.1. Contornos del Sistema de la Corriente del Lazo en los eventos de separación. El punto rojo indica la latitud de retraimiento de la Corriente del Lazo.

Apéndice C

Espectros de las componentes de la velocidad

En este apéndice se muestran los espectros de los puntos seleccionados, acomodados de acuerdo con la isóbata correspondiente. En la primera sección se muestran los periodogramas de los espectros de Fourier y en la segunda los espectros rotatorios.

C.1. Espectros de Fourier

En las Figuras [C.1](#) y [C.2](#) se muestran los periodogramas de los puntos de la isóbata de 50 m y de la isóbata de 200 m, respectivamente. Por cada punto hay cuatro periodogramas, correspondientes a las componentes del campo de velocidad. Se indica el periodo anual (línea azul) y el nivel de confianza al 95% (línea roja). Las escalas en el eje Y de todos los espectros son las mismas.

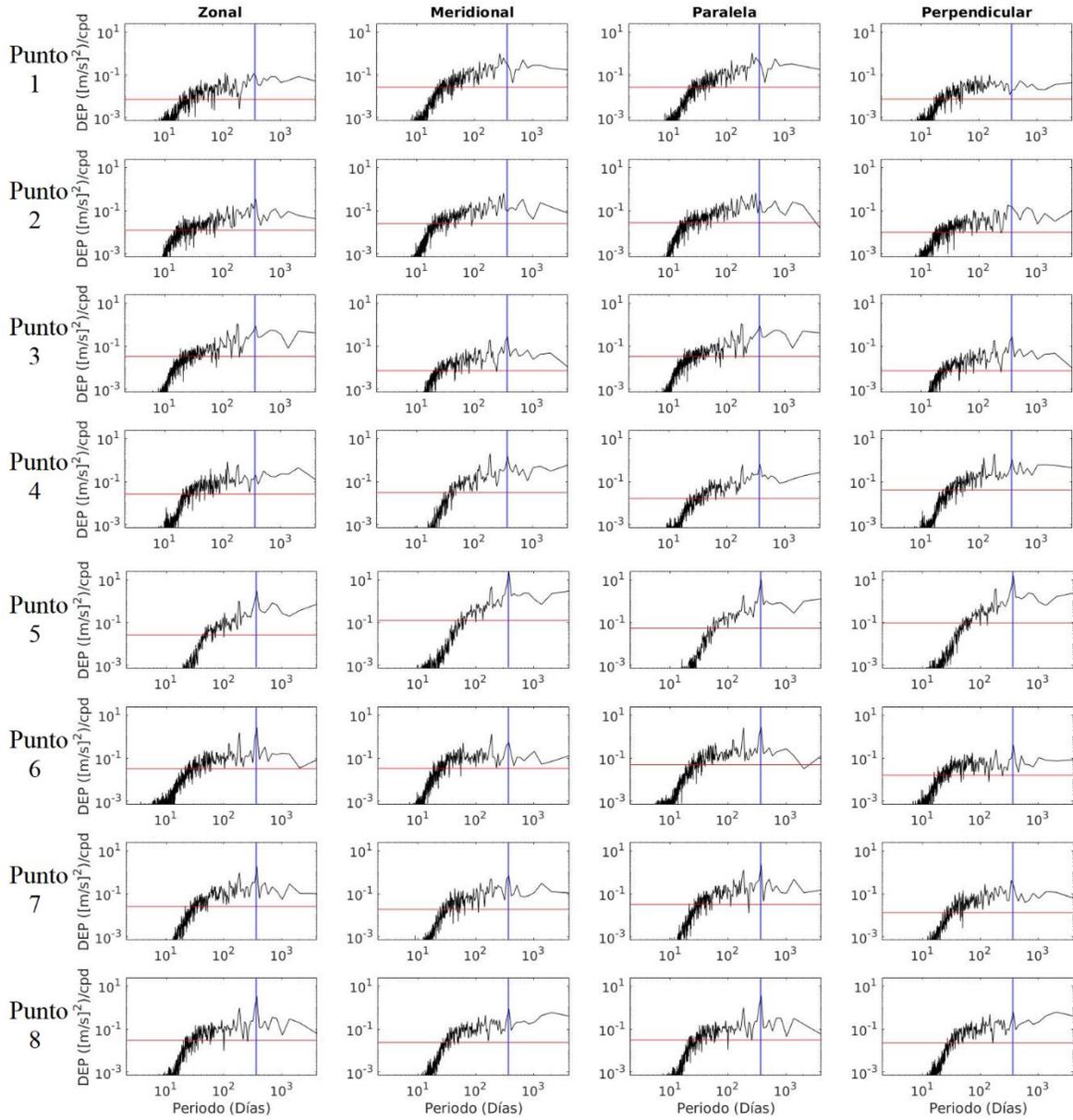


Figura C.1. Espectros replicados de las componentes de velocidad de los puntos de la isóbata de los 50 m, aplicando la técnica de *zero-padding*. La línea vertical azul se encuentra en el periodo anual. La línea horizontal indica el nivel de confianza al 95%.

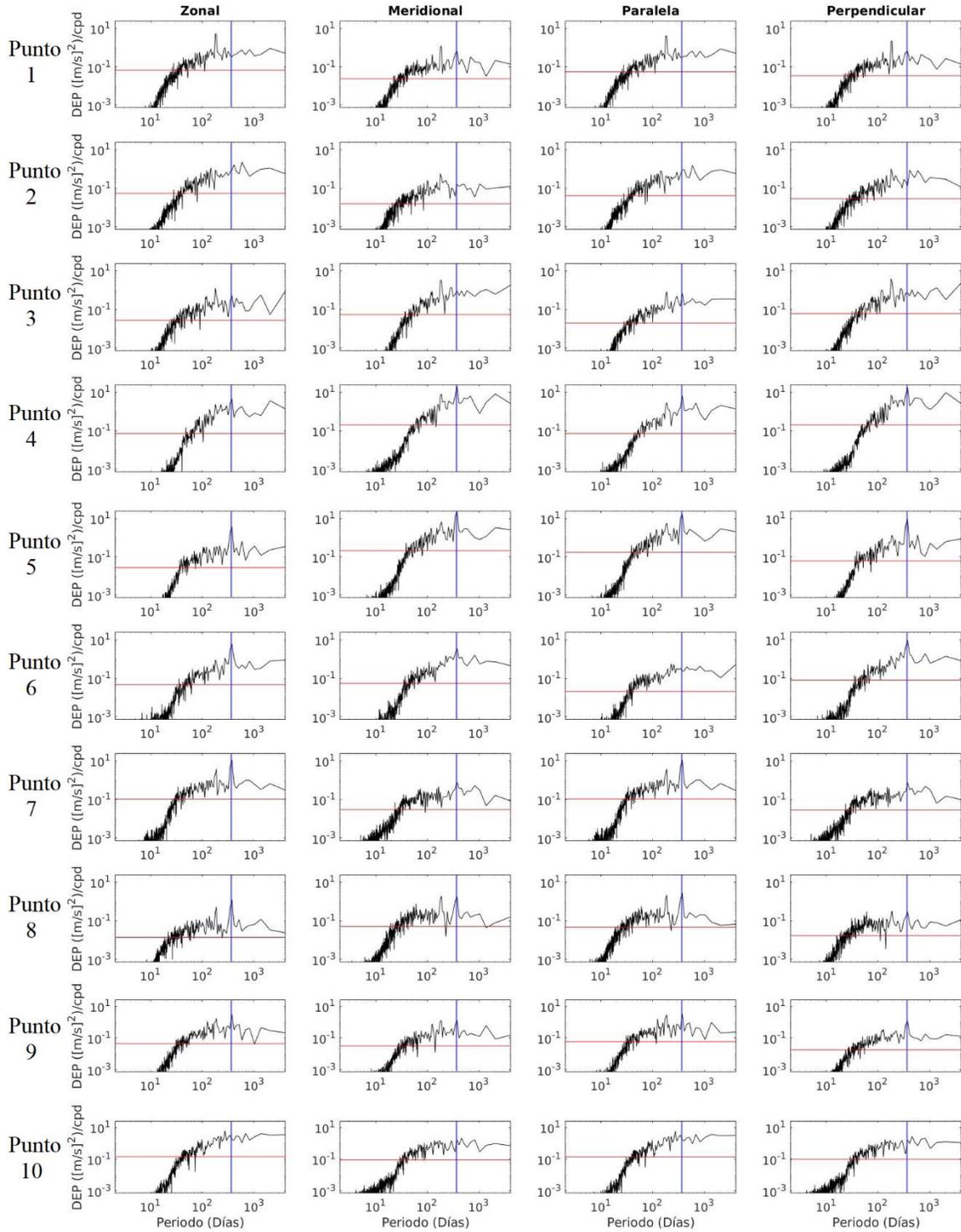


Figura C.2. Espectros replicados de las componentes de velocidad de los puntos de la isóbara de los 200 m, aplicando la técnica de *zero-padding*. La línea vertical azul se encuentra en el periodo anual. La línea horizontal indica el nivel de confianza al 95%.

C.2. Espectros rotatorios

En las Figuras C.3 y C.4 se muestran los espectros rotatorios de los puntos de la isóbata de 50 m y de la isóbata de 200 m, respectivamente. La componente en sentido horario se muestra en color azul, y la componente antihoraria en color rojo. Los puntos negros indican los periodos de interés que se discuten en la sección 6.2. Para que se pudieran visualizar adecuadamente los espectros se utilizaron escalas diferentes en los ejes Y.

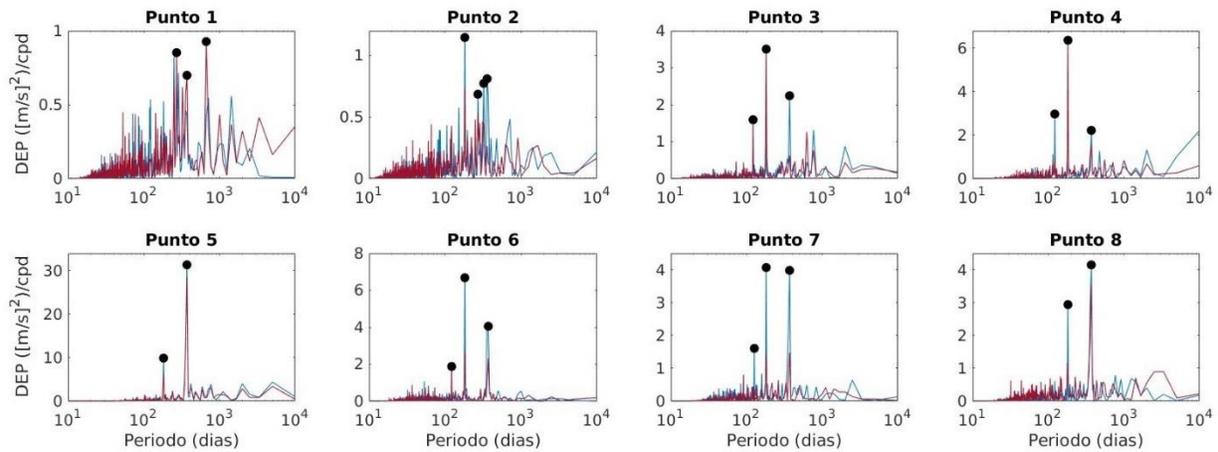


Figura C.3. Espectros de las componentes rotatorias en sentido horario (color azul) y antihorario (color rojo) de los puntos de la isóbata de los 50 m. Los puntos negros indican los periodos significativos, a los cuales se les calcularon los coeficientes rotatorios r . Nótese que los ejes verticales no están en la misma escala.

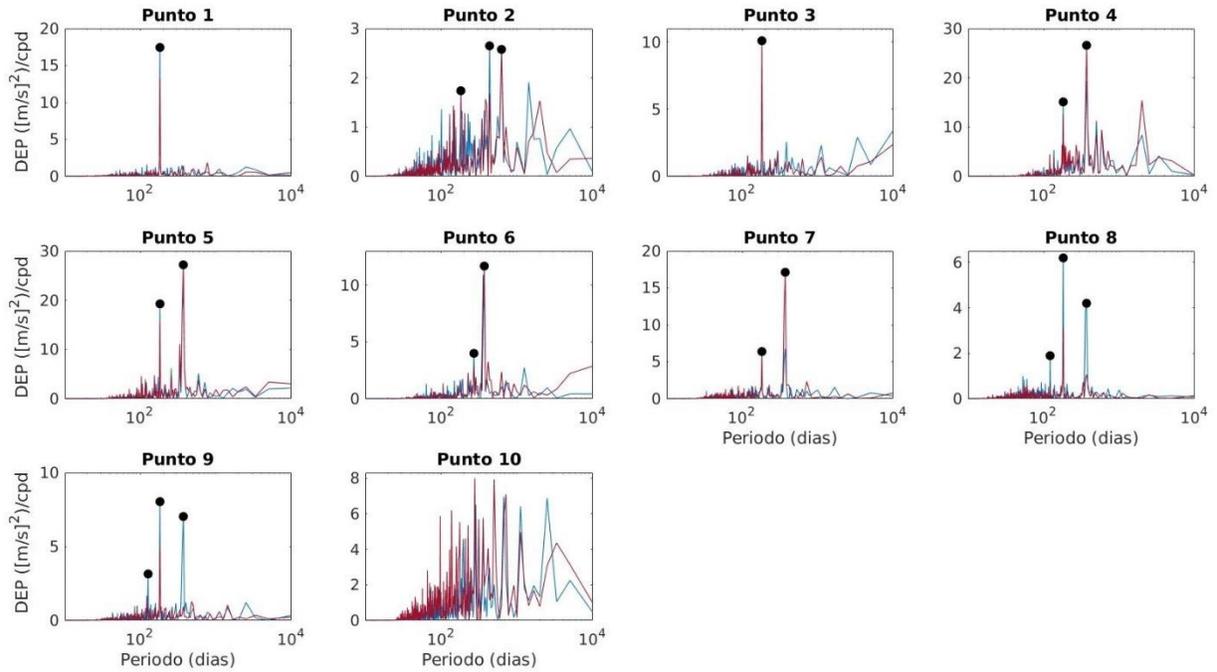


Figura C.4. Espectros de las componentes rotatorias en sentido horario (color azul) y antihorario (color rojo) de los puntos de la isóbata de los 200 m. Los puntos negros indican los periodos significativos, a los cuales se les calcularon los coeficientes rotatorios r . Nótese que los ejes verticales no están en la misma escala.