



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA VARIABILIDAD  
DE LARGO PLAZO DE LAS CORRIENTES  
OCEÁNICAS EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL  
DEL GOLFO DE MÉXICO**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geofísico**

**P R E S E N T A**

Sebastián Colín Jiménez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Luis Efraín Moreles Vázquez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



# Jurado de examen

Presidente: Dr. Frank Raúl Gío Argáez

Vocal: Dr. Luis Efraín Moreles Vázquez

Secretario: Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda

1<sup>er</sup> Suplente: Dr. Jorge Zavala Hidalgo

2<sup>do</sup> Suplente: Dr. Ernesto Caetano Neto Dos Santos

Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, CDMX., México

## Asesor de tesis

Dr. Luis Efraín Moreles Vázquez

---

Firma

# Agradecimientos

A mi mamá y a mi hermana, por apoyarme siempre, orientarme, aconsejarme y amarme. Por entenderme y compartir su vida conmigo.

A mi tutor, el Dr. Luis Efraín Moreles Vázquez, por introducirme en la oceanografía física a pesar de que yo no tenía mucho conocimiento en la disciplina, por aceptarme a partir del servicio social y orientarme en todas mis actividades. Gracias por brindarme su asesoría y apoyo.

Al jurado de esta tesis por tomarse el tiempo de revisar el escrito, al Dr. Frank Raúl Gío Argáez, al Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda, al Dr. Jorge Zavala Hidalgo y al Dr. Ernesto Caetano Neto Dos Santos.

A mis amigos de la facultad, incluyendo Lilibeth y Guadalupe por su sincera amistad y apoyo brindado.

A mis compañeras de tesis Jenny, Leticia y Susana, por la colaboración y el apoyo a través de mucho tiempo.

A la Facultad de Ingeniería y a la UNAM por educarme y brindarme el mejor conocimiento. Al Instituto de Ciencias del Mar por abrirme las puertas a sus laboratorios. Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA104320.

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Circulación en el Golfo de México . . . . .	5
2.1.1. Fisiografía . . . . .	5
2.1.2. Sistema de la Corriente del Lazo . . . . .	6
2.1.3. Circulación en las plataformas continentales . . . . .	7
2.2. Modelo de circulación general del océano HYCOM . . . . .	10
2.3. Análisis espectral y filtros digitales . . . . .	15
2.3.1. Espectro de Fourier . . . . .	15
2.3.2. Espectros rotatorios . . . . .	18
2.3.3. Filtros Digitales . . . . .	21
<b>3. Datos y métodos</b>	<b>25</b>
3.1. Características de las simulaciones numéricas . . . . .	25
3.2. Datos . . . . .	27
3.3. Procesamiento de los datos . . . . .	28
3.4. Análisis implementados . . . . .	29
<b>4. Resultados</b>	<b>32</b>
4.1. Climatologías mensuales del viento y circulación oceánica . . . . .	33
4.1.1. Esfuerzo del viento superficial . . . . .	33
4.1.2. Corrientes oceánicas en las plataformas . . . . .	36
4.2. Variabilidad de las corrientes oceánicas: análisis multianual . . . . .	42

4.2.1. Plataforma interna . . . . .	42
4.2.2. Plataforma externa . . . . .	50
4.2.3. Potencia espectral promedio . . . . .	57
4.3. Variabilidad de las corrientes oceánicas: análisis estacional . . . . .	58
4.3.1. Plataforma interna . . . . .	59
4.3.2. Plataforma externa . . . . .	61
4.3.3. Potencia espectral promedio . . . . .	68
<b>5. Discusión y conclusiones</b>	<b>72</b>
<b>Referencias</b>	<b>75</b>
<b>A. Espectros del análisis multianual</b>	<b>79</b>
<b>B. Espectros del análisis estacional</b>	<b>84</b>

# Índice de figuras

2.1. Relieve del Golfo de México. Recuperada de Yoskowitz et al. (2013). . . . .	6
2.2. Territorio de México, EE.UU. y Cuba del Golfo de México. Recuperada de Yoskowitz et al. (2013). . . . .	7
2.3. Corriente de Lazo en colores amarillo y naranja. Recuperada de Yoskowitz et al. (2013). . . . .	8
2.4. Esquema del transporte de Ekman en 3D y en planta, caso para el hemisferio norte. Recuperada de Cushman-Roisin and Beckers (2011). . . . .	9
2.5. Capa de Ekman y capa interna. Recuperada de Cushman-Roisin and Beckers (2011). . . . .	9
2.6. Patrones principales de circulación superficial en el GdM. Adaptada de Sanvicente-Añorve et al. (2018). . . . .	11
2.7. Variabilidad mensual de las corrientes en las plataformas continentales en el GdM. Recuperada de Morey et al. (2005). . . . .	12
2.8. Discretización vertical en el sistema coordenado $z$ (arriba), sistema coordenado $\sigma$ (centro) y sistema coordenado $\rho$ (abajo). Modificada de Salazar et al. (2010). . . . .	14
2.9. Vista de una señal en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. A esta última se le llama Espectro de la señal. Recuperada de Langton and Levin (2017). . . . .	15
2.10. Tiempo de cómputo para resolver una transformada de Fourier con $N$ elementos. Recuperada de Proakis and Manolakis (1992). . . . .	18
2.11. Formación de elipses a partir de adición de vectores rotatorios. (a) Componente horaria ( $\omega^-$ ), (b) Componente antihoraria ( $\omega^-$ ) (c) Elipse rotatoria con ángulo de inclinación $\theta$ . Recuperada de Thomson and Emery (2014). . . . .	20
2.12. Respuesta de filtros ideales: pasa bajas, pasa altas, pasa bandas y rechaza bandas o de banda eliminada. Recuperado de Proakis(1992) . . . . .	22
2.13. Respuesta de un filtro real. Recuperado de Proakis and Manolakis (1992). . . . .	23
3.1. Puntos de evaluación en el Golfo de México . . . . .	27
3.2. Rotación del sistema coordenado cartesiano a un sistema alineado con la batimetría. . . . .	28
3.3. Función respuesta del filtro Lanczos pasa bajas con frecuencia de corte de 30 días (0.0333 Hz). . . . .	30

3.4. Comparación entre serie original y serie filtrada para la componente de velocidad paralela a la costa o <i>alongshore</i> . . . . .	30
4.1. Climatología mensual del esfuerzo del viento superficial en el GdM de enero a junio. . . . .	34
4.2. Climatología mensual del esfuerzo del viento superficial en el GdM de julio a diciembre. . . . .	35
4.3. Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento sin forzamiento atmosférico de enero a junio. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m. . . . .	38
4.4. Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento sin forzamiento atmosférico de julio a diciembre. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m. . . . .	39
4.5. Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento con forzamiento atmosférico de enero a junio. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m. . . . .	40
4.6. Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento con forzamiento atmosférico de julio a diciembre. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m. . . . .	41
4.7. Perfiles verticales del coeficiente rotatorio de la velocidad en el sistema alineado con la batimetría para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 50 m en los periodos consistentes en todas las profundidades. . . . .	46
4.8. Perfiles verticales de potencia espectral de las componentes <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> de la velocidad para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 50 m. . . . .	48
4.9. Perfiles verticales del coeficiente rotatorio de la velocidad en el sistema alineado con la batimetría para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 200 m en los periodos consistentes en todas las profundidades. . . . .	54
4.10. Perfiles verticales de potencia espectral de las componentes <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> de la velocidad para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 200 m. . . . .	55
4.11. Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes de velocidad <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> en los puntos de evaluación a lo largo de las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha). Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico. . . . .	58
4.12. Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad <i>alongshore</i> para distintos puntos en la isóbata de los 50 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre. . . . .	62
4.13. Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad <i>cross-shore</i> para distintos puntos en la isóbata de los 50 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre. . . . .	63

4.14. Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad <i>alongshore</i> para distintos puntos en la isóbata de los 200 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre. . . . .	64
4.15. Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad <i>cross-shore</i> para distintos puntos en la isóbata de los 200 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre. . . . .	65
4.16. Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en invierno. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico. . . . .	69
4.17. Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en primavera. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico. . . . .	70
4.18. Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en verano. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico. . . . .	70
4.19. Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en otoño. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico. . . . .	71
A.1. Espectros de Fourier en superficie calculados para los ocho puntos de evaluación en la isóbata de 50 m, para ambas componentes de velocidad, <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95 %, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual. . . . .	80
A.2. Espectros de Fourier en superficie calculados para los diez puntos de evaluación en la isóbata de 200 m, para ambas componentes de velocidad, <i>alongshore</i> y <i>cross-shore</i> para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95 %, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual. . . . .	81

- A.3. Espectros rotatorios en superficie calculados para los ocho puntos de evaluación en la isóbata de 50 m, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. La curva azul representa la rotación horaria y la curva roja la rotación antihoraria, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual. . . . . 82
- A.4. Espectros rotatorios en superficie calculados para los diez puntos de evaluación en la isóbata de 200 m, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. La curva azul representa la rotación horaria y la curva roja la rotación antihoraria, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual. . . . . 83
- B.1. Espectros de Fourier en superficie calculados para el punto de evaluación 5, en la isóbata de 50 m, en TAVE, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. En cada renglón se muestra la estación correspondiente. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95 %, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual. 85
- B.2. Espectros de Fourier en superficie calculados para el punto de evaluación 4 en la isóbata de 200 m, en TAVE, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. En cada renglón se muestra la estación correspondiente. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95 %, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual. . . . . 86

# Índice de cuadros

3.1. Configuración de experimentos realizados con el modelo HYCOM. . . . .	26
4.1. Coeficientes rotarios de los periodos significativos en distintos puntos a largo de la isóbata de 50 m. Experimento sin forzamiento atmosférico. . . . .	43
4.2. Coeficientes rotarios de los periodos significativos en diferentes puntos a lo largo de la isóbata de 50 m. Experimento con forzamiento atmosférico. . . . .	44
4.3. Coeficientes rotarios de los periodos significativos en distintos puntos a largo de la isóbata de 200 m. Experimento sin forzamiento atmosférico. . . . .	51
4.4. Coeficientes rotarios de los periodos significativos en distintos puntos a largo de la isóbata de 200 m. Experimento con forzamiento atmosférico. . . . .	52

# Resumen

Una componente muy importante de circulación oceánica en el Golfo de México (GdM) es la circulación en las plataformas continentales, influenciada principalmente por el esfuerzo del viento, forzamiento asociado con el contenido de nutrientes, procesos de mezcla, flujos de energía e intercambio de materia en las capas superiores del océano. Estudios previos han analizado la variabilidad de las corrientes superficiales en las plataformas en distintas escalas temporales y la influencia del esfuerzo del viento en éstas. Sin embargo, no se ha estudiado con detalle el efecto del forzamiento atmosférico en la variabilidad de largo plazo de dichas corrientes a distintas profundidades. En este trabajo se cuantificaron los cambios que el forzamiento atmosférico produce en las frecuencias significativas, la energía espectral y el coeficiente rotatorio de las corrientes oceánicas a diferentes profundidades en las plataformas continentales del GdM. Para el análisis se utilizaron datos diarios de velocidad en diferentes puntos de evaluación, obtenidos de simulaciones de largo plazo (22 años) de la circulación oceánica en el GdM, sin y con forzamiento atmosférico, realizadas con el modelo HYCOM. Se encontró que hay una relación entre el forzamiento atmosférico y la energía espectral. Sin forzamiento atmosférico la energía espectral se concentra en un rango amplio de periodos; con forzamiento atmosférico, dicha energía se concentra únicamente en los periodos semianual y anual. En cuanto al sentido de giro de las corrientes, se encontró que en la plataforma interna, sin forzamiento atmosférico, éste es principalmente antihorario en todas las plataformas, mientras que con forzamiento atmosférico, éste es más variable y diferente en cada plataforma. La energía espectral decae de manera drástica con la profundidad sin forzamiento atmosférico, y los periodos no son consistentes en la columna de agua. Sin embargo, con forzamiento atmosférico dicha energía se reduce de manera lineal con la profundidad, y los periodos son más consistentes en la columna de agua. El efecto del forzamiento atmosférico en la variabilidad de las corrientes es menor en la plataforma externa, mientras que, en la plataforma interna, el forzamiento atmosférico tiene un mayor efecto, tanto en la intensidad de las corrientes como en su variabilidad.

**Palabras clave:** Golfo de México; circulación oceánica; plataformas continentales; forzamiento atmosférico; variabilidad.

# Abstract

A crucial component of the ocean circulation in the Gulf of Mexico (GoM) is the circulation on the continental shelves, which is mainly influenced by wind stress, forcing associated with nutrient content, mixing processes, energy flows, and matter exchange in the upper layers of the ocean. Previous studies have analyzed the variability of the surface currents in the shelves on different time scales and the influence of wind stress on them. However, the atmospheric forcing effect on the long-term variability of those currents at different depths has not been studied in detail. In this study, the changes that the atmospheric forcing produces in the significant frequencies, the spectral energy, and the rotary coefficient of the ocean currents at different depths in the continental shelves of the GoM were quantified. The analysis used daily velocity data in different evaluation points obtained from long-term simulations (22 years) of the ocean circulation in the GoM, without and with atmospheric forcing, carried out with the HYCOM model. A relationship between the atmospheric forcing and spectral energy was found. Without atmospheric forcing, the spectral energy is concentrated in a wide range of periods; with atmospheric forcing, such energy is concentrated only in the semi-annual and annual periods. Regarding the rotation of the currents, it was found that on the inner platform, without atmospheric forcing, it is mainly counterclockwise on all shelves, while with atmospheric forcing, it is more variable and different on each shelf. The spectral energy decreases drastically with depth without atmospheric forcing, and the periods are not consistent in the water column. However, such energy reduces linearly with depth with atmospheric forcing, and the periods are more consistent in the water column. The atmospheric forcing effect on the currents' variability is moderate on the outer shelf, while on the inner shelf, the atmospheric forcing has a more significant effect, both on the intensity of the currents and their variability.

**Keywords:** Gulf of Mexico; ocean circulation; continental shelves; atmospheric forcing; variability.

# Capítulo 1

## Introducción

El Golfo de México (GdM) es un mar semicerrado con un área de 1,595,210 km<sup>2</sup> y se ubica al este de México y al sur de Estados Unidos. Debido a su inmensa actividad económica es una de las zonas con mayores ingresos económicos en el mundo, por lo que es importante el estudio de las corrientes oceánicas, especialmente en las plataformas continentales, ya que debido a su poca profundidad hay mayor actividad humana, éstas comprenden alrededor de 584,516 km<sup>2</sup>, es decir, un 37 % del área total del GdM (Yoskowitz et al., 2013).

La Corriente del Lazo (CL) es el factor predominante de la dinámica del GdM, no obstante, dicho sistema tiene su principal influencia en mar abierto (Martínez-López and Zavala-Hidalgo, 2009; Zavala-Hidalgo et al., 2014; Weisberg and He, 2003; Schmitz Jr et al., 2005). Por otro lado, la dinámica en las plataformas debe su comportamiento principalmente al esfuerzo del viento, aunque también está influenciada por la marea, ondas y flujos de agua dulce provenientes de ríos y estuarios (Ruggiero et al., 2005). La circulación oceánica en las plataformas continentales del GdM está determinada principalmente por el esfuerzo del viento, cuya influencia es más dominante en la plataforma interna, en especial cuando las plataformas son anchas (Weisberg and He, 2003; Schmitz Jr et al., 2005; Zavala-Hidalgo et al., 2014). Se puede decir que hay dos categorías principales: plataformas con circulación cuasi-permanente y plataformas con circulación variable de acuerdo con la estación del año (Morey et al., 2005; Zavala-Hidalgo et al., 2014; Vázquez De La Cerda et al., 2005). En la primera categoría se encuentran la corriente del Banco de Campeche (CB), con una dirección preferencial oeste-este y la corriente cercana al talud continental de la plataforma Texas-Louisiana (LATEX). Las plataformas Texas-Louisiana (LATEX), Mobile-Alabama-Florida (MAFLA) y la del Oeste de Florida (WFS) pertenecen a la segunda categoría.

La variabilidad en distintas escalas temporales de las corrientes oceánicas superficiales en las plataformas del GdM y la influencia del esfuerzo del viento en éstas se conocen con gran detalle (Zavala-Hidalgo et al. (2003), Morey et al. (2005), Chu et al. (2005), Liu and Weisberg

(2012)), sin embargo, no se ha estudiado con detalle el efecto del viento en la variabilidad de dichas corrientes a distintas profundidades, particularmente en la variabilidad de largo plazo (mayor a escalas anuales).

*Hipótesis:* El esfuerzo del viento modifica de manera importante la variabilidad de la circulación oceánica en las plataformas interna y externa del GdM, con un efecto diferenciado en las componentes paralela y perpendicular a la costa de las corrientes y a diferentes profundidades en la columna de agua.

*Objetivo:* Cuantificar los cambios que el esfuerzo del viento produce en la variabilidad de largo plazo de las corrientes oceánicas a diferentes profundidades en las plataformas continentales interna y externa del GdM, considerando la dirección de las corrientes relativa a la estructura del fondo marino. El análisis de la variabilidad propuesto consiste en analizar la forma del espectro de las corrientes, las frecuencias significativas presentes y la energía espectral contenida (potencia total) en la banda de bajas frecuencias.

Con el propósito de separar el efecto del viento en la circulación oceánica se utilizarán resultados de largo plazo en modo libre (*free-running*) de la circulación en el GdM realizados con el modelo HYCOM para dos casos: uno sin forzamiento atmosférico y otro con él. Se usarán datos diarios de corrientes oceánicas que cubren desde 1994 al 2015, cada 20 m de profundidad para 18 puntos específicos distribuidos en las diferentes plataformas del GdM (CB, TAVE, LATEX, MAFLA y WFS). El propósito es tener un panorama general del comportamiento de la circulación oceánica a lo largo de todo el GdM. Para enfocarnos en la variabilidad de largo plazo, las series de velocidad de las corrientes oceánicas serán filtradas con un filtro Lanczos pasa bajas con un periodo de corte de 30 días para acentuar las bandas de frecuencia de interés.

El análisis consiste de los siguiente pasos, primero se empleará el análisis de Fourier para visualizar el contenido energético en frecuencia de las corrientes a lo largo de las plataformas interna y externa, caracterizadas por las isóbatas de 50 y 200 m. Posteriormente, se aplicarán los espectros rotatorios para inferir la dirección del giro de las corrientes oceánicas.

Los resultados podrán ser de utilidad para investigaciones posteriores relacionadas con el transporte y dispersión de trazadores biológicos, químicos, y geológicos, así como en estudios de intercambio de nutrientes, contaminantes y sedimentos entre distintas zonas dentro de la plataforma continental.

La tesis está organizada de la siguiente manera: en el segundo capítulo se describe la teoría en la que se sustenta la tesis, las generalidades del GdM y su dinámica, tanto general como en las plataformas continentales, las generalidades del modelo HYCOM y el análisis de Fourier y los espectros rotatorios. En el tercero, se muestran las características de las simulaciones utilizadas y los métodos de trabajo. En el cuarto capítulo se presentan los resultados: las climatologías mensuales del esfuerzo del viento y las corrientes oceánicas, el análisis de la variabilidad de las corrientes para todo el rango temporal (22 años) y el análisis estacional. Finalmente, se presentan la discusión y las conclusiones del trabajo en el quinto capítulo.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Circulación en el Golfo de México

#### 2.1.1. Fisiografía

El GdM es un mar semicerrado que tiene contacto con el Mar Caribe por medio del Canal de Yucatán al sur y con el océano Atlántico por el estrecho de Florida al este (Figura 2.1) (Yoskowitz et al., 2013). Comprende territorio de México, EE.UU. y Cuba, con 735,438 km<sup>2</sup>, 700,171 km<sup>2</sup> y 55,862 km<sup>2</sup>, respectivamente. Sin embargo, hay dos zonas sin soberanía alguna, con un área aproximada de 35,000 km<sup>2</sup> (Figura 2.2) (Yoskowitz et al., 2013).

El GdM tiene una gran diversidad ecológica y biológica, ya que se encuentran diversos ecosistemas como humedales, playas, manglares, corales, plataformas carbonatadas, plataformas continentales, taludes oceánicos, islas de barrera, deltas y lagunas (NOAA, 2011).

Su origen se remonta hace 300 millones de años por eventos tectónicos distensivos y subsidentes que iniciaron desde el Jurásico Medio y que todavía continúa como causa de la fragmentación de Pangea (Ochoa et al., 2001). De acuerdo con Padilla y Sánchez (2007), la sedimentación comenzó con el depósito de lechos rojos continentales a lo largo del Triásico Tardío y el Jurásico Temprano. Más tarde, en el Calloviano (Jurásico Medio) se produjo una invasión de agua marina proveniente del Océano Pacífico. Al principio, contaba con poca circulación, un tirante de agua mínimo y alta evaporación, lo que favoreció el depósito de

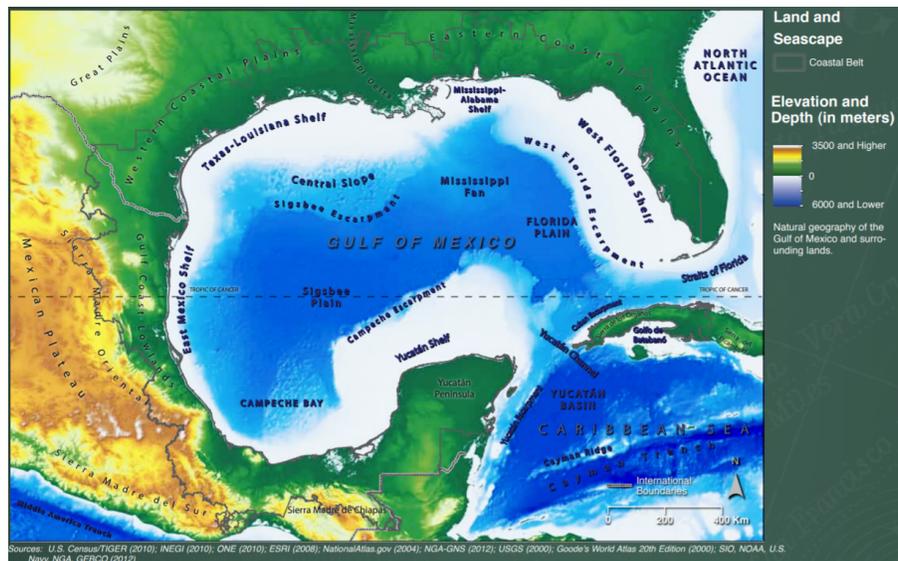


Figura 2.1: Relieve del Golfo de México. Recuperada de Yoskowitz et al. (2013).

grandes volúmenes de sal en la zona central de la cuenca. Posteriormente, desde el Jurásico Tardío hasta el Cretácico Tardío la sedimentación cambió por carbonatos, y finalmente por clásticos a partir del Paleógeno (Cenozoico) por influencia de la Orogenia Laramide.

Debido a diversos eventos geológicos, el GdM presenta plataformas continentales, cercanas a la costa y con menor profundidad. Se pueden definir de manera general cinco grandes plataformas, el CB y TAVE en territorio mexicano y LATEX, MAFLA y WFS en EE.UU. El CB y WFS cuentan con mayor extensión, mientras que TAVE es la que cuenta con menor área y el talud está más cerca de la costa. Las plataformas de LATEX, MAFLA y la parte de LATEX en Tabasco tienen un escarpe suave, en cambio, WFS, la parte de TAVE en Tamaulipas y los límites norte y oeste de CB presentan un escarpe abrupto. Geológicamente hablando, CB y WFS son plataformas carbonatadas, y MAFLA, LATEX y TAVE son plataformas clásticas.

### 2.1.2. Sistema de la Corriente del Lazo

La CL es el sistema dinámico más importante dentro del GdM, es parte de la Corriente del Golfo, la cual es de mayor dimensión y se ubica en el Océano Atlántico Norte. La CL entra por el estrecho de Yucatán, al sur del GdM, con una dirección preferencial al norte y posteriormente cambia abruptamente su dirección hacia el este, de manera que sale por el estrecho de Florida, al este del GdM (Figura 2.3). Una vez que se reincorpora al Océano Atlántico se convierte nuevamente en la Corriente del Golfo.

En el cambio de dirección mencionado previamente se ha registrado una inestabilidad

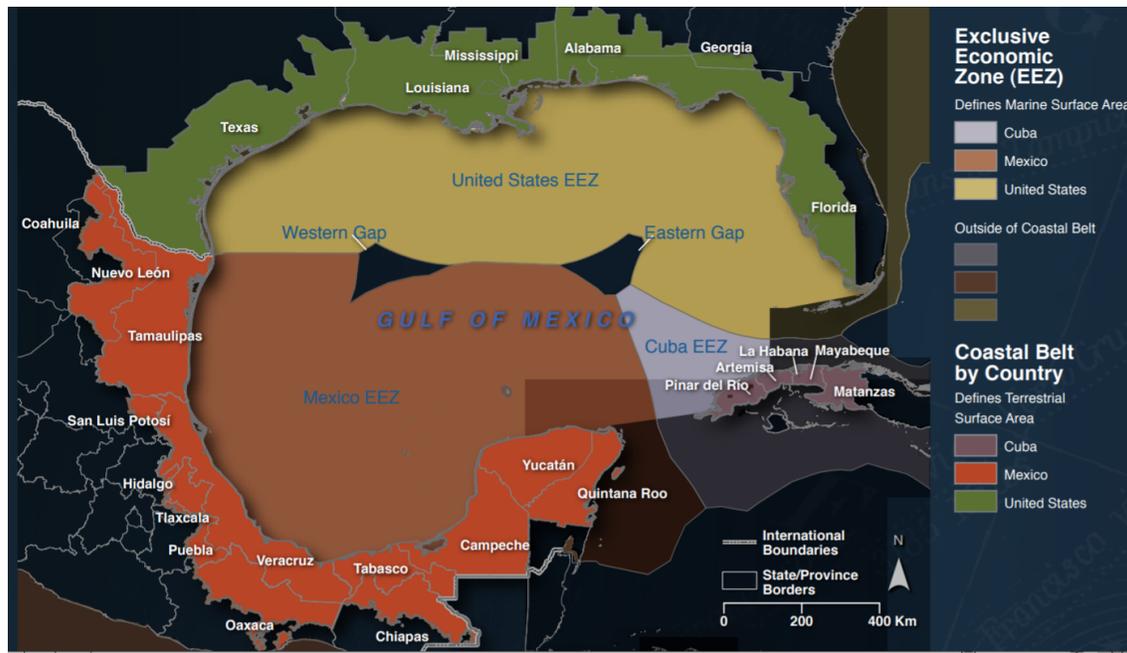


Figura 2.2: Territorio de México, EE.UU. y Cuba del Golfo de México. Recuperada de Yoskowitz et al. (2013).

que genera remolinos anticiclónicos que se desprenden del flujo principal y que posteriormente siguen una trayectoria hacia el oeste. El comportamiento es variable, pueden formarse los remolinos dentro de la corriente sin desprendimiento de este sistema, o desprenderse y reincorporarse nuevamente o por último, desprenderse definitivamente.

Hurlburt and Thompson (1980) plantearon la primera modelación numérica del desprendimiento de los remolinos. Demostraron que se formaban debido a condiciones superficiales del océano, principalmente el viento, y que el desprendimiento se propicia por el efecto de Coriolis. No obstante, aún hoy en día no se conoce con exactitud la dinámica de los remolinos (Sturges and Leben, 2000).

### 2.1.3. Circulación en las plataformas continentales

La circulación en las plataformas continentales se ve influenciada principalmente por el viento, ya que los remolinos de la CL se disipan en el talud continental y pocas veces intervienen en la dinámica costera (Weisberg and He, 2003; Zavala-Hidalgo et al., 2014; Hall and Leben, 2016).

Por un lado está el efecto del transporte de Ekman en las capas más superficiales del océano, producto del esfuerzo del viento, el cual genera un vector velocidad en la superficie del océano. Bajo la influencia de la fuerza de Coriolis y efectos de la viscosidad, dicha velocidad se

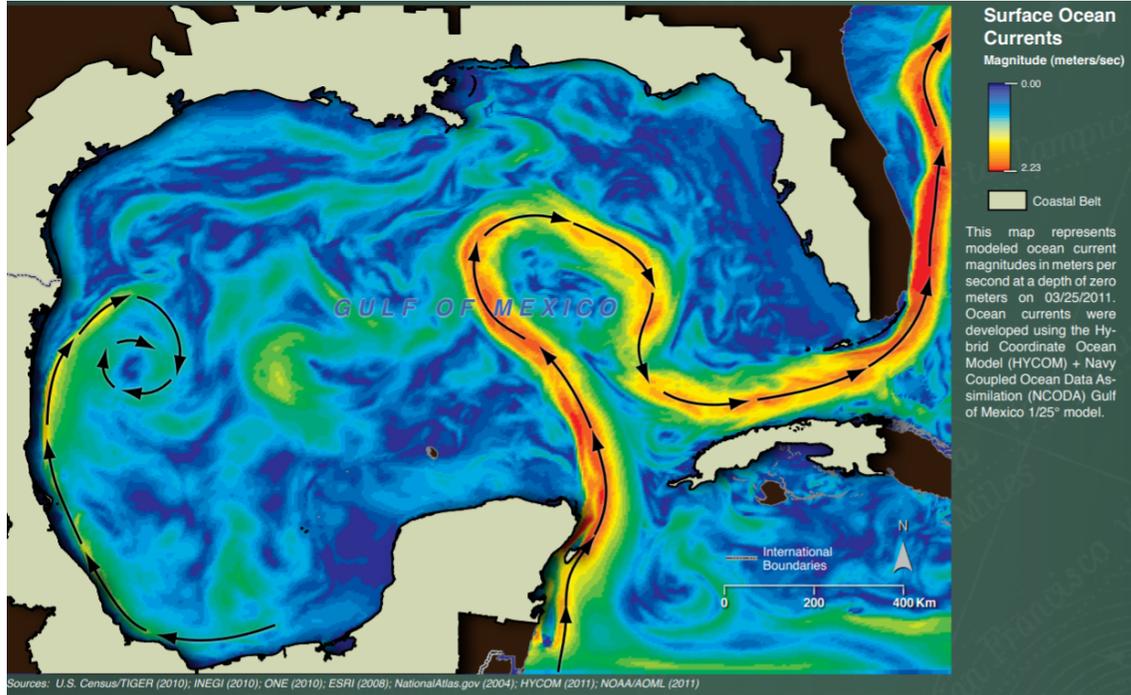


Figura 2.3: Corriente de Lazo en colores amarillo y naranja. Recuperada de Yoskowitz et al. (2013).

atenúa mientras rota conforme incrementa la profundidad, formando un espiral. La dirección del agua superficial está a  $45^\circ$  a la derecha de la dirección del viento y el transporte neto a  $90^\circ$  a la derecha para el hemisferio norte, en el hemisferio sur la dirección se invierte para estar a la izquierda de la dirección del viento (Apel, 1987). En la Figura 2.4 se ilustra un esquema en 3D y en planta del transporte de Ekman.

Una expresión usual para el esfuerzo del viento en la superficie es la siguiente (Cushman-Roisin and Beckers (2011)),

$$\tau = \rho_a c_d u_w |u_w|,$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $c_d$  la constante de viscosidad y  $u_w$  la velocidad del viento. Este esfuerzo se manifiesta en la minúscula capa de Ekman, que suele ser de 10 a 100 m dependiendo la zona y se ve afectada por el viento; después se ubica la capa interna, cuya dinámica es independiente del viento (Figura 2.5)(Pedlosky et al., 1987).

La ecuación de transporte ageostrófico en la capa de Ekman está determinado por,

$$\vec{M} = -\frac{1}{f} \vec{k} \times \vec{\tau},$$

donde  $f$  es el parámetro de Coriolis y  $\vec{\tau}$  el esfuerzo del viento.

Las corrientes generadas por el viento son más intensas en superficie y decrecen con la

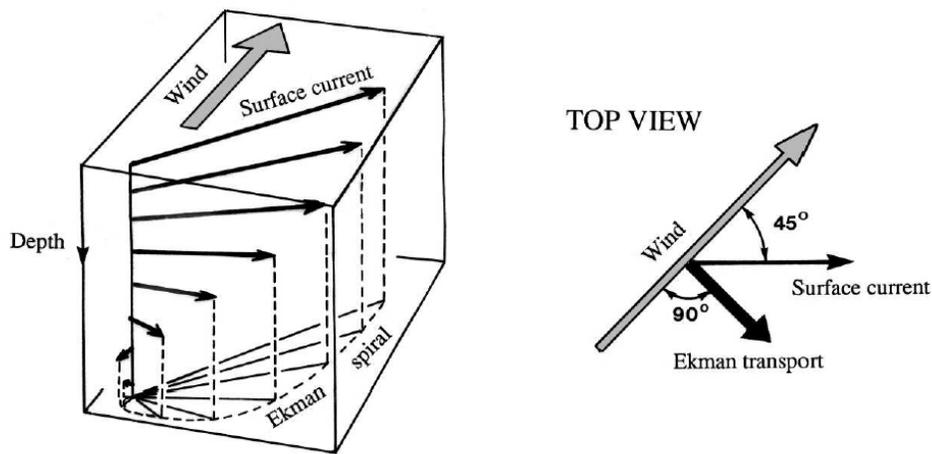


Figura 2.4: Esquema del transporte de Ekman en 3D y en planta, caso para el hemisferio norte. Recuperada de Cushman-Roisin and Beckers (2011).

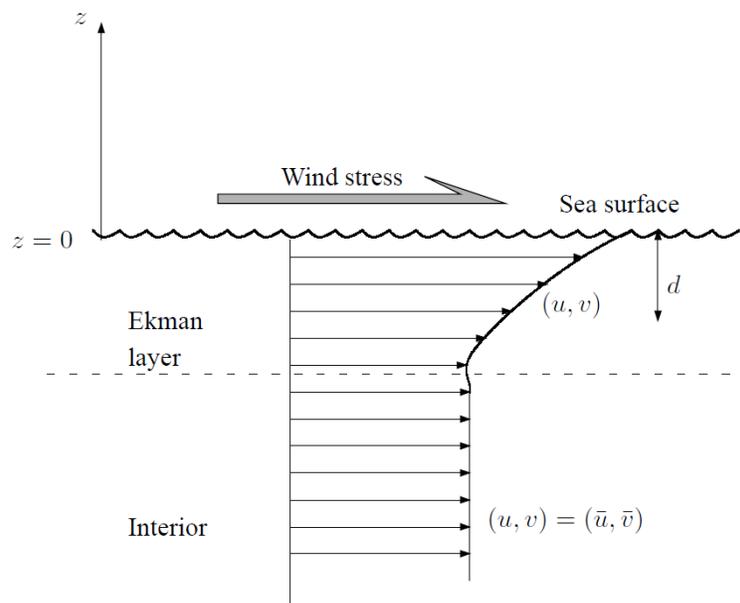


Figura 2.5: Capa de Ekman y capa interna. Recuperada de Cushman-Roisin and Beckers (2011).

profundidad, su magnitud depende de la rapidez del viento y de la rugosidad de la superficie del océano, las cuales modifican la transferencia de momento del viento al agua (Ruggiero et al., 2005; Talley, 2011). El viento contribuye al bombeo vertical de nutrientes, a la mezcla de propiedades biogeoquímicas en las capas superiores del océano, así como en los flujos de energía e intercambio de gases en la interfaz océano-atmósfera (Muller-Karger et al., 2015).

En la Figura 2.6 se observa la circulación superficial en las plataformas del GdM a lo largo del año, donde se observa que el CB es la única plataforma con un mismo sentido de dirección en todo el año. En WFS, LATEX y TAVE se observa un cambio estacional en el sentido, en WFS la circulación va hacia el norte en el verano y hacia el sur de otoño a primavera, en LATEX la circulación tiene un sentido hacia el este en verano y hacia el oeste de otoño a primavera, en TAVE la circulación va hacia el norte de primavera a verano y al sur de otoño a invierno (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Chu et al., 2005; Liu and Weisberg, 2012).

Por otro lado, en la Figura 2.7 se observa la variabilidad mensual de las corrientes en las plataformas continentales, esto permite apreciar con mayor detenimiento la dirección de las corrientes. De acuerdo con Morey et al. (2005), en WFS entre los meses de mayo y julio las corrientes se intensifican, y de septiembre a marzo las corrientes decrecientan, en donde marzo es el mes menos energético, con corrientes principalmente al sur de la plataforma. En LATEX se observan comportamientos diferentes de la circulación en la plataforma interna y externa. Para la plataforma interna la circulación siempre es hacia el oeste y más intensa en primavera y otoño, principalmente en marzo, abril, septiembre y octubre; a inicios del verano (durante junio y julio) la circulación se debilita. Para la plataforma externa el sentido de la circulación es hacia el este en casi todo el año, durante la primavera se tienen corrientes con mayor velocidad y durante el otoño y el invierno la velocidad es mínima; durante el verano la velocidad de las corrientes no disminuye en comparación con la plataforma interna, por lo que esto explica la inversión del sentido de la corriente discutido para la Figura 2.6. En TAVE de marzo a agosto se debilita la intensidad de las corrientes, la cual se aprecia claramente frente a las costas de Veracruz de marzo a mayo y en julio, mientras que en las costas de Tamaulipas es en junio y agosto. Finalmente, en el CB la circulación es hacia el norte al este de la plataforma, hacia el este al norte de la plataforma y hacia el suroeste al oeste de la plataforma, con corrientes más intensas en primavera y verano, principalmente en abril y mayo, las cuales se debilitan en otoño e invierno, las corrientes en la plataforma interna siguen la línea de costa, mientras que en la plataforma externa se desvían hacia el exterior de la plataforma, con un sentido hacia a mar abierto.

## 2.2. Modelo de circulación general del océano HYCOM

El Modelo Oceánico Coordinado Híbrido, HYCOM por sus siglas en inglés, es un modelo lagrangiano donde la ecuación de continuidad se resuelve en modo pronóstico en todo el dominio, empleando la técnica Arbitraria Lagrangiano-Euleriana para reasignar la coordenada vertical y mantener distintos tipos de coordenadas dentro de todo el dominio (Adcroft and Hallberg, 2006; Chassignet et al., 2007). La última versión contiene siete algoritmos de mezcla vertical, tres de modelos de difusión vertical y dos de difusión horizontal (Chassignet et al., 2007).

HYCOM es el sucesor del modelo MICOM, Modelo Isopícnico Coordinado de Miami, por sus

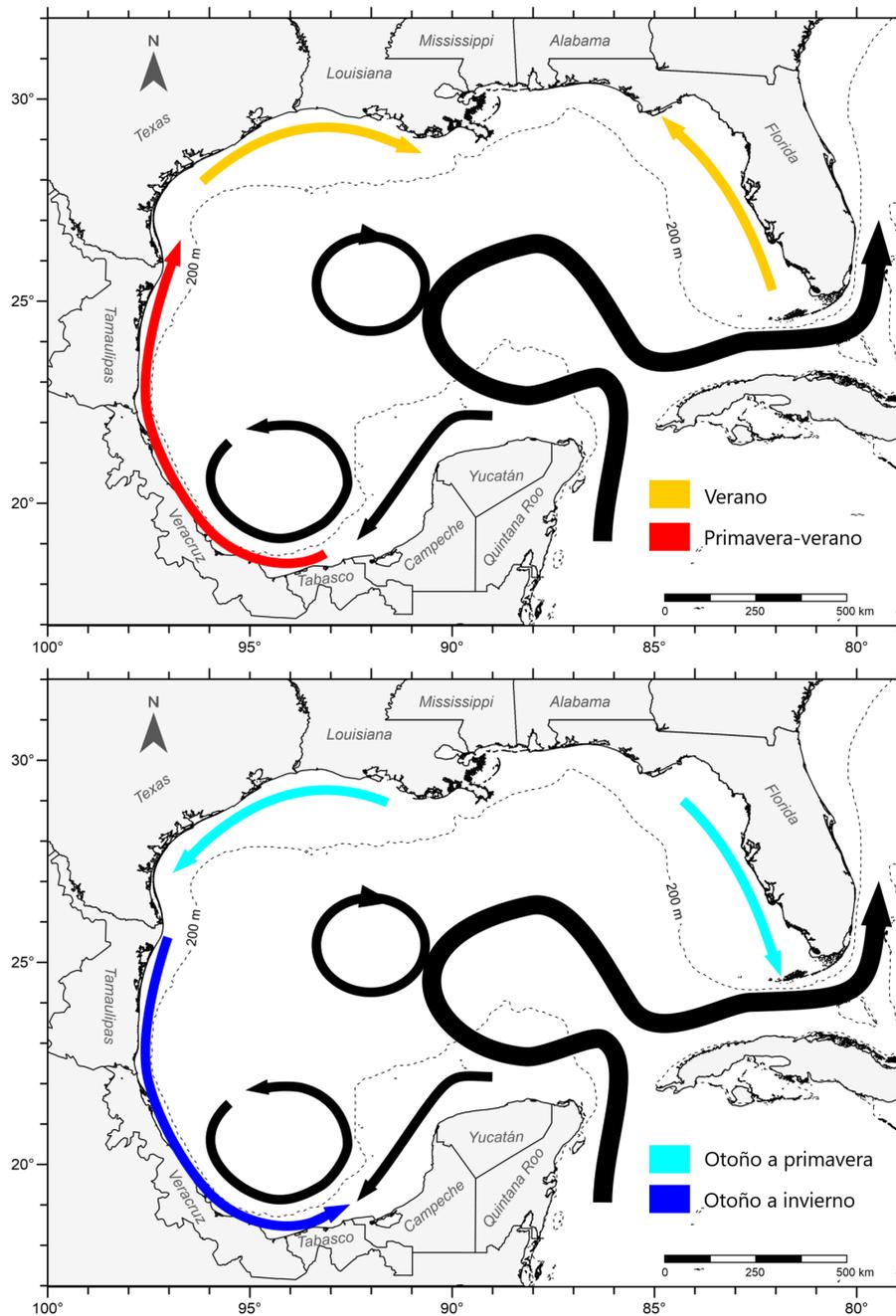


Figura 2.6: Patrones principales de circulación superficial en el GdM. Adaptada de Sanvicente-Añorve et al. (2018).

siglas en inglés y su objetivo fue mejorar el desempeño del MICOM en algunos aspectos como: baja resolución vertical en algunas zonas del dominio, la solución de la intrusión de una capa de agua en otra y la representación de la estratificación (Chassignet et al., 2007). HYCOM

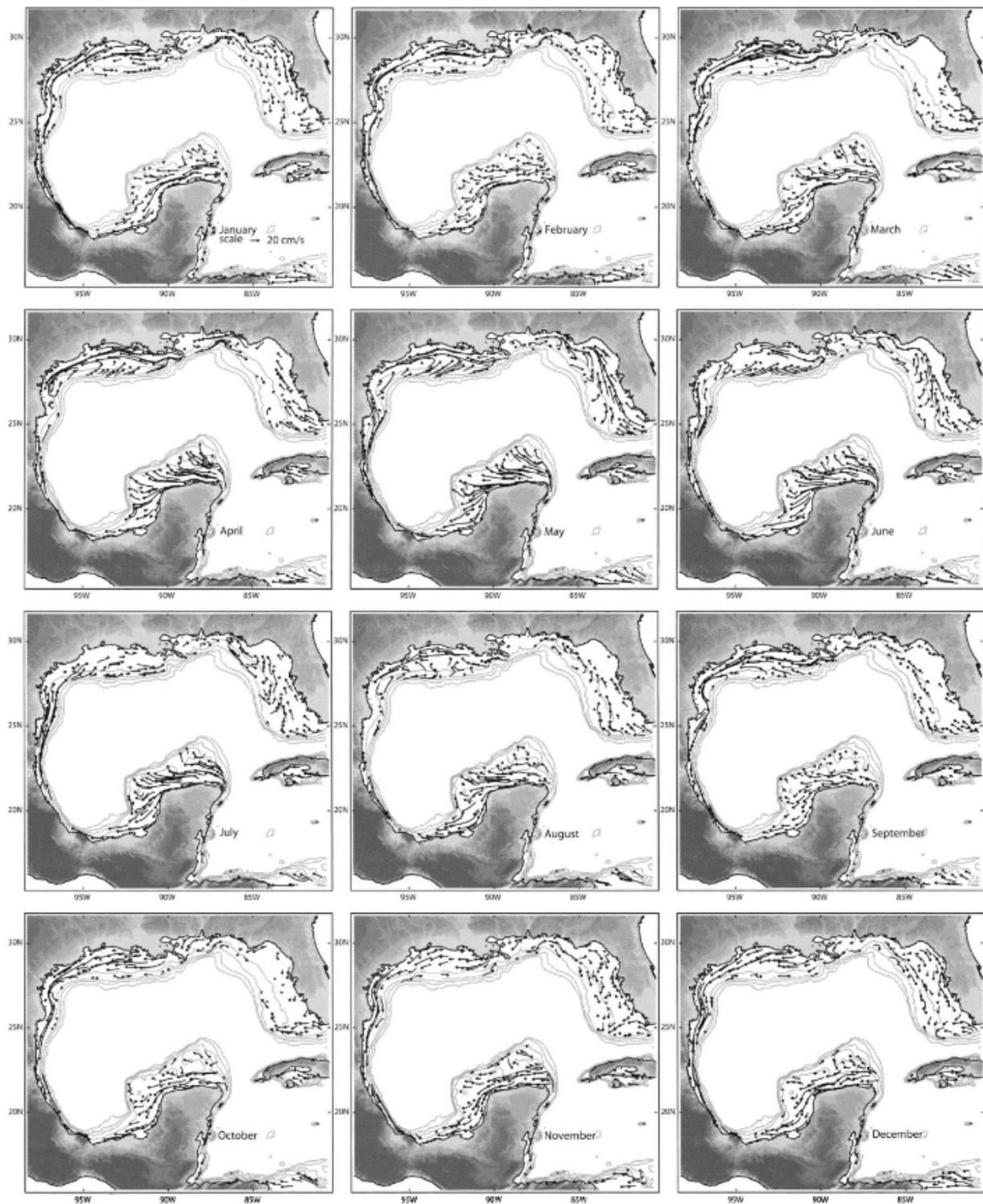


Figura 2.7: Variabilidad mensual de las corrientes en las plataformas continentales en el GdM. Recuperada de Morey et al. (2005).

permite evaluar tanto zonas someras como profundas conservando una resolución apropiada, ya que ajusta el sistema coordenado óptimo dependiendo la ubicación: en las partes del océano estratificado el modelo emplea coordenadas isopícnas, en las regiones someras y costeras emplea coordenadas  $\sigma$  y para regiones no estratificadas y capa de mezcla se usan coordenadas  $z$  (Salazar et al., 2010).

En la Figura 2.8 se ilustran los tres tipos de coordenadas verticales que emplea HYCOM. Como se observa,  $z$  está definido por capas horizontales,  $\sigma$  responde a la topografía del fondo marino y  $\rho$  define las capas de acuerdo a los valores de densidad de cada capa del medio estratificado. De acuerdo con Chassignet et al. (2007) y Salazar et al. (2010), debido a que es posible ajustar las coordenadas para la discretización vertical, se simplifica la representación de diferentes procesos físicos oceánicos sin disminuir la resolución ni calidad en los resultados.

Las variables de HYCOM se guardan en una malla tipo Arakawa C, con las componentes de momento, velocidad, las variables termodinámicas y los trazadores almacenados en los puntos de la cuadrícula de presión  $p$ . Se emplean siete algoritmos de mezcla vertical, de los cuales tres son modelos diferenciales continuos: parametrización de perfil  $K$ , cerradura de turbulencia nivel 2 del Instituto Goddard de Estudios Espaciales y cerradura de turbulencia nivel 2.5 Mellor-Yamada, y cuatro modelos de compresibilidad: el modelo de inestabilidad de Price y tres versiones del modelo Kraus-Turner (Halliwell, 2004).

El generador de malla es el algoritmo final que se ejecuta durante cada paso temporal del modelo. Primero intenta restaurar la densidad de una capa determinada, de acuerdo a la densidad de referencia isopícnica en caso de que sea necesario. Si una capa es menos densa que su densidad de referencia isopícnica, el modelo mueve la interfaz inferior hacia abajo para que el flujo de agua más densa a través de esta interfaz restablezca la densidad isopícnica. Si la capa es más densa, el modelo moverá la interfaz superior hacia arriba Chassignet et al. (2007).

Para mantener el espesor mínimo, el modelo especifica una constante de espesor mínimo  $\delta k$  para cada capa  $k$  por separado, de esta manera las capas cercanas a la superficie con densidades que exceden sus valores de referencia no pueden recuperar las condiciones isopícnas. El algoritmo intenta elevar las interfaces por encima de cada capa para arrastrar agua más ligera, pero se ve limitada por la aplicación de espesor mínimo utilizando una función de amortiguamiento (Bleck, 2002) que produce una transición suave del dominio isopícnico al dominio  $p$  (Halliwell, 2004).

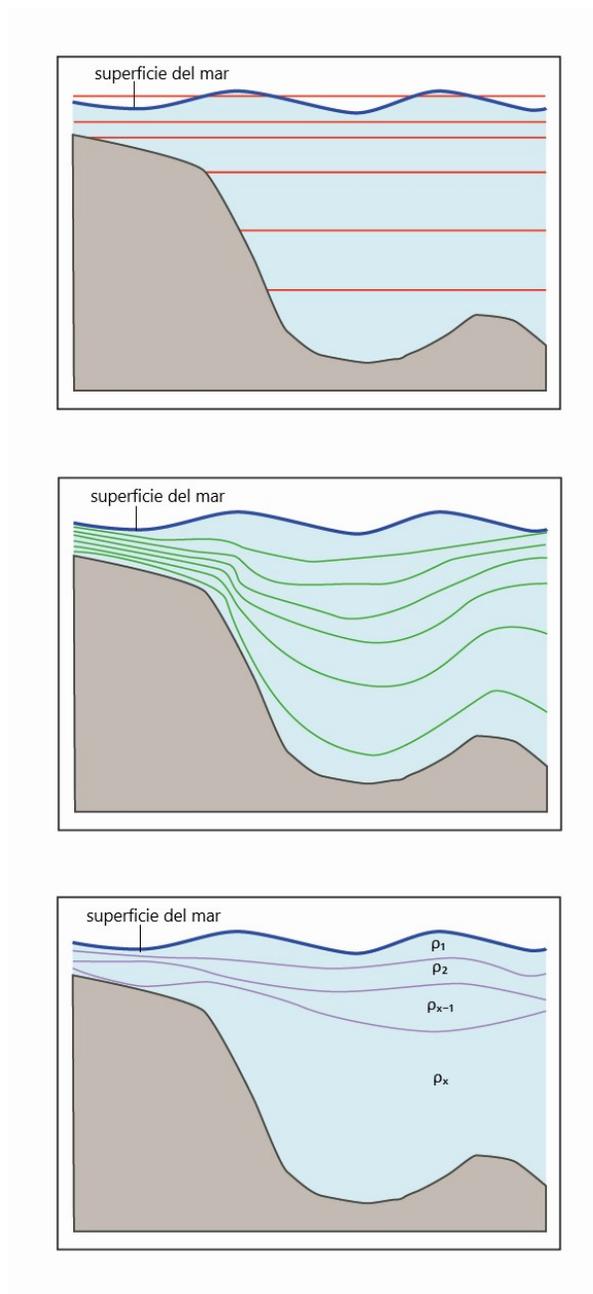


Figura 2.8: Discretización vertical en el sistema coordenado  $z$  (arriba), sistema coordenado  $\sigma$  (centro) y sistema coordenado  $\rho$  (abajo). Modificada de Salazar et al. (2010).

## 2.3. Análisis espectral y filtros digitales

### 2.3.1. Espectro de Fourier

Entre el siglo XVIII y XIX, Jean-Baptiste Fourier desarrolló la solución a la ecuación de la difusión de calor ( $\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ ), donde  $T$  es la temperatura,  $K$  la constante de difusión de calor del material,  $t$  el tiempo y  $x$  el espacio. La solución consiste de modos normales, los cuales a través del principio de superposición se expresan como

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (b_n e^{-\lambda_n^2 t} \sin \mu_n x),$$

donde  $b_n$ ,  $\lambda_n$  y  $\mu_n$  son constantes asociadas a cada modo normal (Langton and Levin, 2017).

Gracias a esta ecuación, Fourier concluyó que cualquier señal puede ser representada como la suma de un conjunto de sinusoides armónicos (Langton and Levin, 2017),

$$v(k, x) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \sin kx + b_k \cos kx)$$

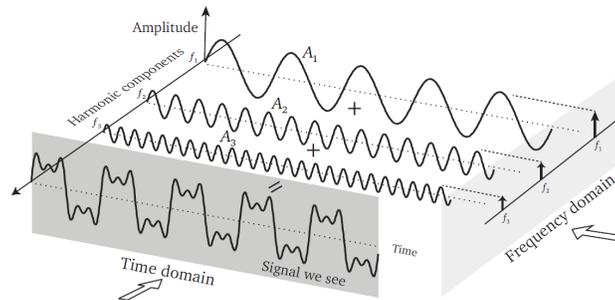


Figura 2.9: Vista de una señal en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. A esta última se le llama Espectro de la señal. Recuperada de Langton and Levin (2017).

Esto conlleva al análisis de Fourier, que es el estudio de las componentes de una señal en el dominio de la frecuencia, las cuales se pueden visualizar en una gráfica denominada espectro (Figura 2.9).

Thomson and Emery (2014) mencionan que el ruido también se manifiesta en el dominio de la frecuencia mediante amplitudes aleatorias a lo largo del espectro, por lo que las señales periódicas son las únicas que presentan amplitudes definidas.

Dentro del espectro, hay dos frecuencias importantes, la frecuencia fundamental, aquella más baja, a partir de la cual se pueden generar las frecuencias dominantes, o armónicos, que son expresados como múltiplos de la frecuencia fundamental  $f_0 = \frac{1}{T}$ . La otra frecuencia es la frecuencia de Nyquist, que es aquella más alta que se puede registrar en la señal analizada, la cual está representada de la siguiente manera:

$$f_N = \frac{\frac{N}{2}}{T} = \frac{1}{2\Delta t},$$

donde  $T$  representa el periodo total abarcado,  $\Delta t$  es el intervalo de muestra y  $N$  el número total de muestras, que puede expresarse a su vez como  $N = \frac{T}{\Delta t}$ .

Se puede redefinir la serie de Fourier a partir de su frecuencia fundamental y la frecuencia angular  $\omega_p$ . También se añade la media o el offset de la serie,

$$y(t) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{p=1}^{\infty} (A_p \cos \omega_p t + B_p \sin \omega_p t)$$

donde  $\omega_p = 2\pi f_p = 2\pi p f_1 = \frac{2\pi p}{T}$ .

Para obtener los coeficientes  $A_p$  se multiplica la ecuación anterior por  $\cos \omega_p t$  para reducir los términos a través de identidades trigonométricas y se integra, resultando en:

$$A_p = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos \omega_p t dt.$$

Para  $B_p$  se multiplica por  $\sin \omega_p t$ . El resultado es:

$$B_p = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin \omega_p t dt.$$

Por otro lado, la serie de Fourier se puede expresar a partir de un sólo valor de amplitud:

$$y(t) = \frac{1}{2}C_0 + \sum_{p=1}^{\infty} (C_p \cos w_p t - \phi_p), \quad (2.1)$$

donde  $C_p = \sqrt{(A_p^2 + B_p^2)}$  y  $\phi_p = \arctan \frac{B_p}{A_p}$ , el cual es el ángulo de fase asociado al retraso relativo en radianes medido en sentido antihorario desde el eje real. A partir de este valor se puede conocer el desfase de tiempo correspondiente para el componente  $p$ -ésimo, expresado como  $\tau_p = \theta/(2\pi f_p)$ . De forma integral se define el coeficiente  $C_k$  como

$$C_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) e^{-j\omega_p t} dt.$$

La transformada de Fourier convencional resulta demasiado lenta al ejecutar las operaciones, debido a que se emplea una multiplicación de dos matrices, sin embargo, Danielson and Lanczos (1942) crearon un algoritmo eficaz que resuelve la transformada de Fourier en menor tiempo, partiendo de la división de los valores pares e impares, establecidos de la forma

$$\left. \begin{array}{l} \text{caso par} \quad n = 2r \\ \text{caso impar} \quad n = 2r + 1 \end{array} \right\} r = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.2)$$

Consecuentemente, el método encuentra el valor de la transformada a partir de la suma de ambos conjuntos multiplicados por un factor en común. Siguiendo la siguiente regla para cada valor,

$$X[k] = X_{pares}[k] + e^{\frac{-i2\pi k}{n}} X_{impar}[k], \quad \text{donde } i = \sqrt{-1} \quad (2.3)$$

De esta manera, el tiempo computacional para la transformada de Fourier convencional es  $O(N^2)$  y por medio de la transformada rápida,  $O(N \log_2 N)$ . Para tener una mejor idea del beneficio, observemos la figura 2.10 donde el primer renglón corresponde al número de elementos, el segundo la cantidad de tiempo para resolverlo por transformada de Fourier convencional y en el tercero por el algoritmo FFT.

$N$	1000	$10^6$	$10^9$
$N^2$	$10^6$	$10^{12}$	$10^{18}$
$N \log_2 N$	$10^4$	$20 \times 10^6$	$30 \times 10^9$

Figura 2.10: Tiempo de cómputo para resolver una transformada de Fourier con  $N$  elementos. Recuperada de Proakis and Manolakis (1992).

### 2.3.2. Espectros rotatorios

De la misma manera que se obtiene un espectro de Fourier a partir del análisis para conocer las componentes de una señal y las frecuencias dominantes; se puede realizar un procedimiento similar para una cantidad vectorial a través de los espectros rotatorios. Los espectros rotatorios implica la separación del vector en componentes circulares rotatorias en sentido horario y antihorario, siendo este análisis útil para estudiar corrientes sobre topografía abrupta, movimientos inerciales, ondas en plataforma continental y otras formas de flujo oscilatorio de banda estrecha (Thomson and Emery, 2014).

Siguiendo los pasos del procedimiento publicado por Thomson and Emery (2014) aplicable para cualquier sistema referenciado, se considera el vector resultante  $g$  de las componentes zonal y meridional de velocidad  $u$  y  $v$  respectivamente,

$$g(t) = u(t) + iv(t) \quad , u, v \in \mathbb{R}. \quad (2.4)$$

Inicialmente se remueve la media de la serie,

$$g'(t) = g(t) - (\overline{u(t)} + i\overline{v(t)}) \quad , u, v \in \mathbb{R} \quad (2.5)$$

Y aplicando la descomposición en serie de Fourier (Eq. 2.1) se obtiene la siguiente expresión,

$$g'(t) = \sum_{k=1}^N [U_{1k} \cos(\omega_k t) + U_{2k} \sin(\omega_k t)] + i[V_{1k} \cos(\omega_k t) + V_{2k} \sin(\omega_k t)] \quad (2.6)$$

donde  $\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi k f_0 = \frac{2\pi k}{T_0} = \frac{2\pi k}{N\Delta t}$ . Se elimina la notación de prima para las funciones

y se escribe

$$g(t) = \sum_{k=1}^N (g_k(t))$$

Usando la expresión del coseno y el seno en forma exponencial,

$$\cos(\omega_k t) = \frac{1}{2}(e^{i\omega_k t} + e^{-i\omega_k t}),$$

$$\sin(\omega_k t) = \frac{i}{2}(e^{-i\omega_k t} - e^{i\omega_k t}),$$

la función  $g_k(t)$  se puede expresar como

$$g_k(t) = \frac{U_{1k}}{2}(e^{i\omega_k t} + e^{-i\omega_k t}) + \frac{iU_{2k}}{2}(e^{-i\omega_k t} - e^{i\omega_k t}) + \frac{iV_{1k}}{2}(e^{i\omega_k t} + e^{-i\omega_k t}) + \frac{i^2 V_{2k}}{2}(e^{-i\omega_k t} - e^{i\omega_k t}) \quad (2.7)$$

Organizando términos

$$g_k(t) = \frac{1}{2}[(U_{1k} + V_{2k}) + i(V_{1k} - U_{2k})]e^{i\omega_k t} + \frac{1}{2}[(U_{1k} - V_{2k}) + i(U_{2k} + V_{1k})]e^{-i\omega_k t}$$

$$g_k(t) = \underbrace{\frac{1}{2}[(U_{1k} + V_{2k})^2 + (V_{1k} - U_{2k})^2]^{1/2} e^{i\epsilon_k^+} e^{i\omega_k t}}_{\text{rotación antihoraria en tiempo}} + \underbrace{\frac{1}{2}[(U_{1k} - V_{2k})^2 + (U_{2k} + V_{1k})^2]^{1/2} e^{i\epsilon_k^-} e^{-i\omega_k t}}_{\text{rotación horaria en tiempo}},$$

Desarrollando para el  $k$ -ésimo término de la serie, considerando componentes horaria y anti-horaria, se tiene:

$$g_k(t) = A_k^+ e^{i\epsilon_k^+} e^{i\omega_k t} + A_k^- e^{i\epsilon_k^-} e^{-i\omega_k t}, \quad g_k(t) = g_k^+(t) + g_k^-(t),$$

donde

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

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

Y los ángulos de fase son:

$$\epsilon_k^+ = \arctan \frac{V_{1k} - U_{2k}}{U_{1k} + V_{2k}}$$

$$\epsilon_k^- = \arctan \frac{U_{2k} + V_{1k}}{U_{1k} - V_{2k}}$$

Cada uno de estos elementos contribuyen a la formación de una elipse con semieje mayor igual a  $(A_k^+ + A_k^-)$  y un semieje menor igual a  $|A_k^+ - A_k^-|$  y un ángulo de inclinación medido a partir del eje real igual a  $\theta = \frac{1}{2}(\epsilon_k^+ + \epsilon_k^-)$  (Figura 2.11).

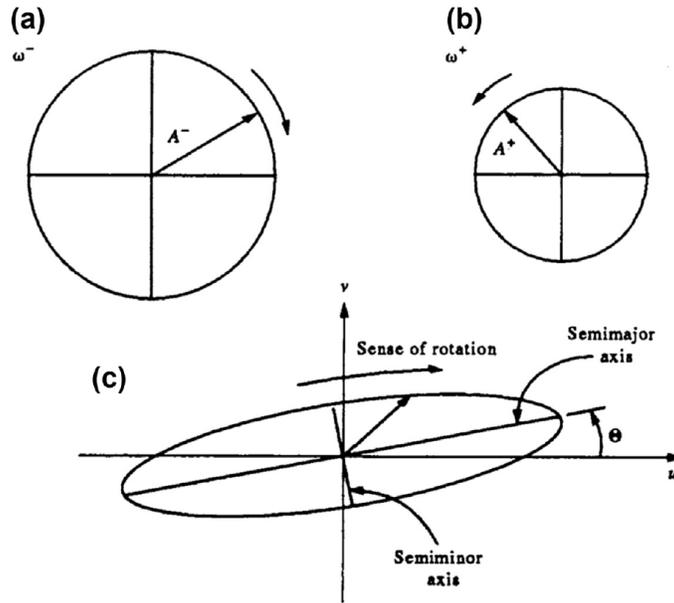


Figura 2.11: Formación de elipses a partir de adición de vectores rotatorios. (a) Componente horaria ( $\omega^-$ ), (b) Componente antihoraria ( $\omega^+$ ) (c) Elipse rotatoria con ángulo de inclinación  $\theta$ . Recuperada de Thomson and Emery (2014).

Finalmente, el espectro de un sólo lado queda:

$$S_k^+ = \frac{(A_k^+)^2}{N\Delta t}, \quad (2.8)$$

$$S_k^- = \frac{(A_k^-)^2}{N\Delta t}, \quad (2.9)$$

donde  $S_k^+$  es la componente antihoraria del espectro y  $S_k^-$  es la componente horaria del espectro. El coeficiente rotatorio se define de la siguiente manera:

$$r(\omega) = \frac{S_k^+ - S_k^-}{S_k^+ + S_k^-}, \quad (2.10)$$

el cual indica el sentido de giro de la serie vectorial analizada. Dado el cociente de la ecuación, el rango de valores abarca desde -1 hasta 1, si el coeficiente es menor a cero corresponde a un movimiento horario, mayor a cero un movimiento antihorario e igual a cero, un flujo unidireccional sin giro.

### 2.3.3. Filtros Digitales

Un filtro es una herramienta de procesamiento que elimina componentes de frecuencia no deseados en una señal mediante la modificación de las amplitudes de Fourier propias de una serie determinada. Teóricamente, se habla de filtros ideales que permiten el paso de una banda de frecuencias y rechazan todas las demás. (Prabhu, 2014) Como se ilustra en la Figura 2.12, de acuerdo al rango de frecuencias sobre el que actúan, los filtros se dividen en: filtros pasa bajas, pasa altas, pasa bandas y rechaza bandas.

Al diseñar un filtro se debe especificar primeramente la frecuencia de corte  $\omega_c$ , correspondiente al valor donde la función decae de un valor diferente de cero a cero (Proakis and Manolakis, 1992). Para el caso del filtro pasa bajas, la respuesta en frecuencia es

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |\omega| \leq \omega_c \\ 0, & \omega_c < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (2.11)$$

y la respuesta al impulso del filtro ( $H(n)$ ) es descrita a partir de la transformada inversa de Fourier para una función con respuesta unitaria,

$$H(n) = \begin{cases} \frac{\sin \omega_c n}{\pi n}, & -\infty < n < \infty \\ \frac{\omega_c}{\pi}, & n = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Debido a que este filtro ideal pasa bajas no corresponde a una función causal, no se puede implementar. Para forzar que un filtro sea causal, el teorema de Paley-Wiener nos afirma que  $|H(\omega)|$  debe estar asociado a una fase de respuesta  $\Theta(\omega)$ , obteniendo la respuesta asociada al filtro  $H(\omega) = |H(\omega)|e^{i\Theta(\omega)}$ .

Dadas las circunstancias, es imposible que el corte sea abrupto, por lo que se presenta un

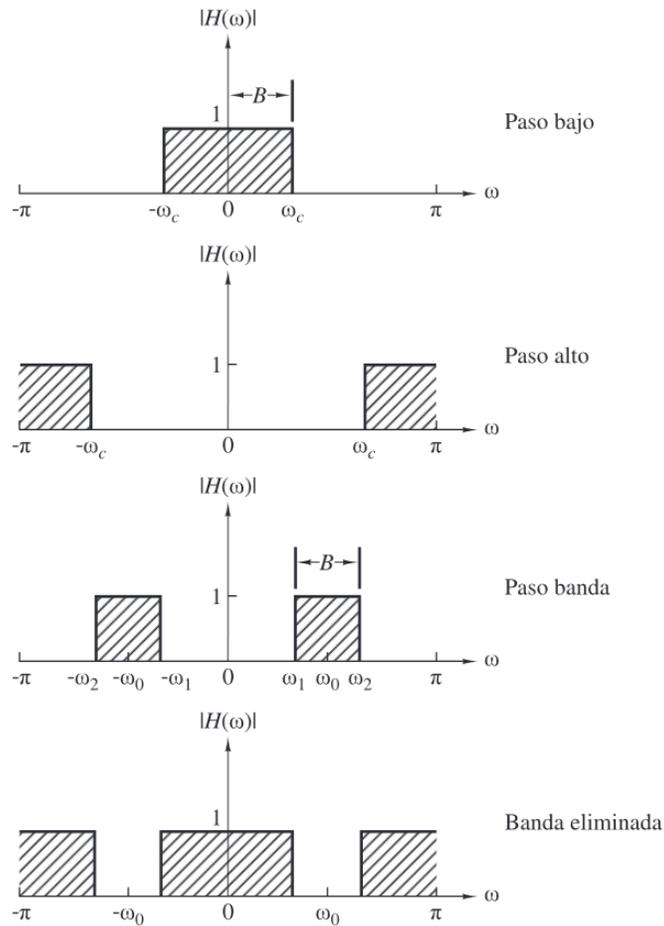


Figura 2.12: Respuesta de filtros ideales: pasa bajas, pasa altas, pasa bandas y rechaza bandas o de banda eliminada. Recuperado de Proakis(1992)

leve rizado en la banda de paso y la banda eliminada (Figura 2.13). La transición entre estas dos zonas define la banda de transición.

### Filtro Lanczos

Este filtro, desarrollado por el físico y matemático húngaro Cornelius Lanczos, consiste en una función modificada a partir de un set de pesos arrojados que alteran la señal a estudiar, nombrada la función de pesos del filtro. Esta función se expresa como una serie de Fourier infinita, por lo que los pesos se convierten en los coeficientes de Fourier, los cuales se truncan por efectos prácticos. Entre menor sea el número de pesos, mayor será la oscilación de Gibbs, por lo que Lanczos propuso efectuar una convolución con una función rectangular, cuyo ancho es el periodo de la onda de interés. Dicha convolución recibe el nombre de factor de sigma, y

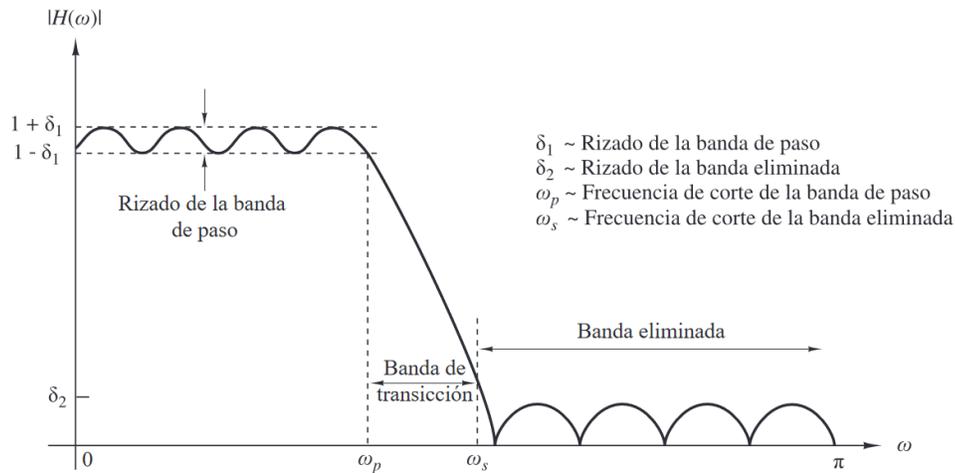


Figura 2.13: Respuesta de un filtro real. Recuperado de Proakis and Manolakis (1992).

multiplicado por la serie original produce la serie filtrada (Duchon, 1979).

Siguiendo el desarrollo matemático desarrollado por Duchon (1979), donde se considera la serie original  $x_t$ , donde  $t$  es el tiempo,  $y_t$  la serie final y  $\omega_k$  los pesos, se formula la relación lineal

$$y_t = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \omega_k x_{t-k}.$$

La relación se puede estudiar en el dominio de la frecuencia llevando a cabo la transformada de Fourier de la expresión anterior,

$$Y(f) = R(f)X(f),$$

donde  $X(f)$  y  $Y(f)$  son las funciones de densidad de amplitud respectivamente,  $R(f)$  es la función de densidad de frecuencia y  $f$  es la frecuencia.

La función de pesos y la función de respuesta en frecuencia comprenden una relación por medio de la siguiente serie de Fourier,

$$R(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \omega_k e^{i2\pi f k \Delta},$$

$$\omega_k = \frac{1}{2f_N} \int_{-f_N}^{f_N} R(f) e^{-i2\pi f k \Delta} df,$$

donde  $k$  abarca los números enteros desde  $-\infty$  hasta  $\infty$  y  $\Delta$  es el intervalo de muestreo y  $f_N$  es la frecuencia de Nyquist.

Se procede a definir la frecuencia de corte y para suprimir el efecto de Gibbs, se lleva a cabo la convolución con una función rectangular definida como

$$h(f) = \begin{cases} n/2f_N, & |f| \leq f_N/n \\ 0, & |f| > f_N/n, \end{cases} \quad (2.13)$$

la convolución resulta

$$\bar{R}(f) = \frac{n}{2f_N} \int_{-f_N/n}^{f_N/n} R(f+v) dv.$$

Delimitando la serie de la expresión de límites infinitos a un rango determinado

$$\bar{R}_n(f) = \sum_{k=-n}^n \omega_k e^{i2\pi f k \Delta} = \bar{\omega}_0 + 2 \sum_{k=1}^n \omega_k \cos(2\pi f k \Delta),$$

donde

$$\bar{\omega}_k = \frac{1}{2f_N} \bar{R}(f) e^{-i2\pi f k \Delta} df.$$

Sustituyendo resulta

$$\bar{\omega}_k = \omega_k \frac{\sin(2\pi k f_N \Delta / n)}{2\pi k f_N \Delta / n},$$

conocido como factor  $\sigma$ , el cual modifica los valores de amplitud de la serie original.

# Capítulo 3

## Datos y métodos

### 3.1. Características de las simulaciones numéricas

Se emplearon las salidas de dos simulaciones de la circulación oceánica en el GdM realizadas con el modelo HYCOM, considerando dos experimentos: uno sin forzamiento atmosférico y otro con forzamiento atmosférico. La implementación de dichas simulaciones se realizó como parte del proyecto PAPIIT-UNAM IA104320, cuyas salidas se pueden acceder a través del repositorio [metadata.icmyl.unam.mx/handle/20.500.12201/11339](https://metadata.icmyl.unam.mx/handle/20.500.12201/11339). El primer experimento, OBNoW-25, considera una resolución de  $1/25^\circ$ , 41 capas híbridas, condiciones de fronteras de una climatología mensual provenientes del anidamiento al experimento global GLBb0.08, desde 1994 hasta el 2015, y sin forzamiento atmosférico. El segundo es el experimento OBW-25, con la misma configuración que el ONBNoW-25, excepto por la adición de forzamiento atmosférico usando los datos de una climatología horaria proveniente de CFSR desde 1994 hasta el 2010 y de CFSRv2 desde el 2011 hasta el 2015. En la tabla 3.1 se resume la configuración de ambos experimentos.

CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) es un producto de sistema global de alta resolución que representa la interacción entre la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y las capas de hielo, desarrollado por NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*). El modelo también toma en cuenta variaciones por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) junto con cambios producidos por aerosoles y variaciones solares. El rango temporal abarca de 1992 al 2010 y las variables disponibles incluyen: tasa de precipitación, temperatura de superficie del

Cuadro 3.1: Configuración de experimentos realizados con el modelo HYCOM.

Experimento	Resolución	Número de capas	Condiciones de frontera	Forzamiento atmosférico
OBNoW-25	1/25°	41	climatología mensual (1994-2015) de GLBb0.08	No
OBW-25	1/25°	41	climatología mensual (1994-2015) de GLBb0.08	CFSR(1994-2010) CFSv2(2011-2015) cada hora

mar, temperatura del aire, humedad, velocidad del viento, entre otros (Saha et al., 2010).

CFSRv2 es la versión 2 de la CFSR, con datos descargables desde el 2011 hasta el día de hoy, ya que sigue en curso. Inició operaciones en marzo del 2011 y cuenta con las mismas variables que el modelo anterior, sin embargo, esta versión más reciente incluye modificaciones para mejores pronósticos estacionales y sub-estacionales, principalmente para la oscilación Madden-Julian, con un incremento de 6 a 17 días, mayor exactitud en temperatura y mejoras en observaciones de SST global en comparación con su antecesor (Saha et al., 2014).

Las condiciones de frontera mensuales están dadas por los datos del experimento global GLBb0.08, correspondientes al análisis global de NCODA (*Navy Coupled Ocean Data Assimilation*) realizadas de manera diaria, asimilando las observaciones de altímetro satelital disponibles, la concentración de hielo marino medida con satelites, la temperatura superficial del mar detectada satelitalmente e in situ, así como los perfiles verticales de temperatura y salinidad disponibles in situ a través de XBT (batitermógrafos) y boyas de la misión Argo.

La climatología mensual del GEM4 se utilizó para inicializar las simulaciones y proveer las condiciones de relajación en superficie y las fronteras laterales abiertas, considerando las variables de temperatura potencial, presión y profundidad de interfaz de capa.

Las simulaciones numéricas se realizaron compilando y ejecutando la versión 2.3.01 del código fuente del modelo HYCOM. Las simulaciones se realizaron para el periodo del 1 de enero de 1994 al 31 de diciembre de 2015. Se obtuvieron salidas instantáneas diarias de distintas variables, las cuales incluyen el campo de velocidad, temperatura, salinidad y densidad.

La documentación completa de la configuración del modelo, simulaciones numéricas y validación de los resultados se podrá consultar en breve en repositorios de la base de datos UNINMAR del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

## 3.2. Datos

Los datos utilizados fueron los valores de las componentes zonal y meridional de la velocidad ( $u$  y  $v$ ) a diferentes profundidades (datos cada 20 m). Se empleó el software MATLAB, versión 2021a, donde se leyeron los datos, así como los archivos correspondientes a las isóbatas de los 50 m y 200 m referenciadas geográficamente y la línea de costa para efectos prácticos de visualización.

Primeramente, se llevó a cabo la interpolación de velocidades a las isóbatas, para que cada punto de estas tuviera un valor de velocidad asociado. Una vez realizado esto, se procedió a elegir los puntos a analizar. Se escogieron dieciocho puntos distribuidos de tal manera que se abarca en su totalidad el GdM, los cuales se observan en la Figura 3.1. Se tienen once puntos en territorio mexicano y siete en estadounidense; cuatro se encuentran en CB, cinco en TAVE, cuatro en LATEX, uno en MAFLA y dos en WFS.

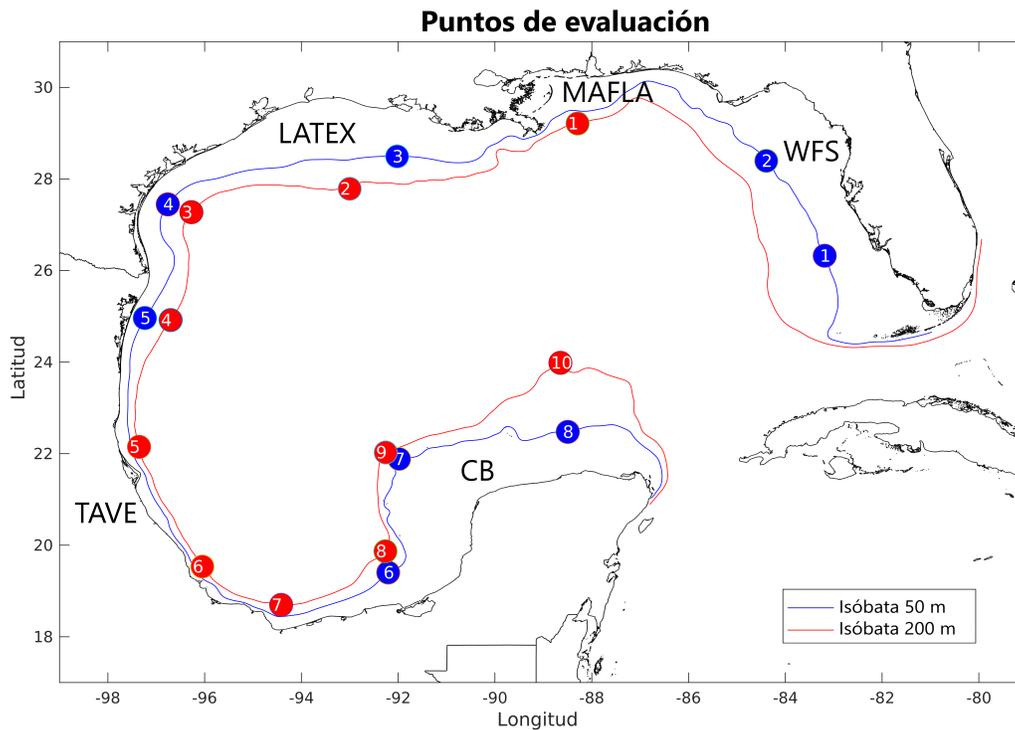


Figura 3.1: Puntos de evaluación en el Golfo de México

Para algunos sitios de CB, LATEX, MAFLA y WFS el talud continental tiene una pendiente poco abrupta, abarcando ambas isóbatas, la de 50 m y 200 m. Por otro lado, para las plataformas TAVE y MAFLA sólo se consideraron puntos ubicados en la isóbata de los 200 m, debido a la pendiente pronunciada que provoca que ambas curvas de profundidad estén muy juntas, impidiendo visualizar correctamente los valores de la isóbata de los 50 m.

### 3.3. Procesamiento de los datos

Por lo general, las componentes de la velocidad horizontal se registran en el sistema coordenado cartesiano, norte y este ( $x$  y  $y$ ). No obstante, dicho sistema es de utilidad únicamente en mar abierto. Para el estudio en zonas costeras y plataformas continentales conviene llevar cabo una transformación de coordenadas a un sistema en función de la batimetría, con componentes paralela y perpendicular, por lo que se calcularon las nuevas componentes del sistema coordenado consistente con la fisiografía.

Siguiendo el esquema ilustrado en la Figura 3.2, podemos suponer un ángulo  $\theta$  que relaciona los ejes de las abscisas de ambos sistemas coordenados, los vectores  $\hat{i}$  y  $\hat{j}$  en la dirección de las componentes de velocidad zonal y meridional, y el sistema primado relacionado al sistema coordenado de las isóbatas, donde  $\vec{I}$  es un vector paralelo a la isóbata definido localmente.

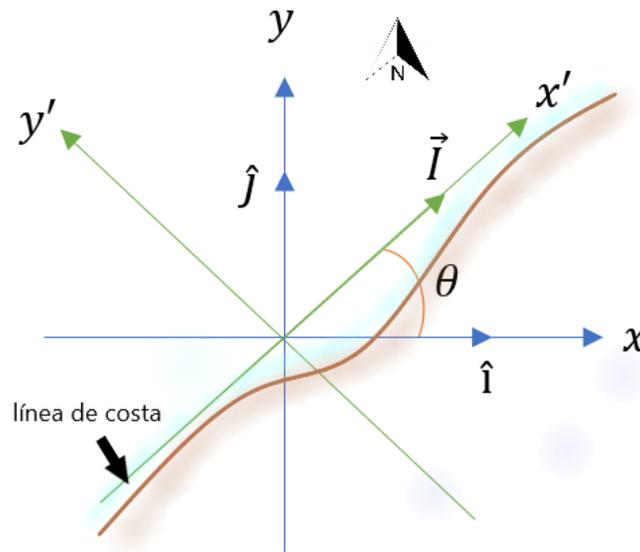


Figura 3.2: Rotación del sistema coordenado cartesiano a un sistema alineado con la batimetría.

De tal forma que la relación entre ambos sistemas está definida por

$$\vec{I} \cdot \hat{i} = \|\vec{I}\| \|\hat{i}\| \cos \theta,$$

donde

$$\vec{I} = (I_x, I_y),$$

con  $I_x$  dirigido a lo largo de la isóbata y  $I_y$  perpendicular a la isóbata. Despejando el coseno, resulta

$$\cos \theta = \frac{\vec{I} \cdot \hat{i}}{\|\vec{I}\|} = \frac{I_x}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2}}$$

La matriz de transformación resultante es:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

De la ecuación anterior,  $x'$  y  $y'$  son las componentes de la velocidad paralela y perpendicular a la isóbata que se utilizarán posteriormente.

Después, se filtraron ambas componentes usando un filtro Lanczos con periodo de corte de 30 días y 61 pesos asignados, generado utilizando el *NCAR Command Language*, NCL de tal manera que se promedian 30 datos consecutivos y se asigna el valor en la siguiente posición. Al final, a la serie original se le remueven 30 datos al inicio y 30 al final, igual a 60 posiciones menos respecto a la original. Se optó por el filtro Lanczos debido a la forma de su banda de transición en comparación con otros filtros, su función respuesta se ilustra en la Figura 3.3. En la Figura 3.4 se comparan la serie original y la serie filtrada, donde se observa el suavizado realizado para eliminar variaciones de alta frecuencia.

### 3.4. Análisis implementados

Posteriormente, se obtuvieron las variables para el periodograma, indispensables para llevar a cabo el análisis de Fourier, empleando la función de la transformada rápida de Fourier, explicada brevemente en el capítulo 3, sección 3.3. Dicho procedimiento se aplicó para ambas componentes de velocidad de cada sistema coordinado, se graficó el periodograma y se identificaron las frecuencias significativas. Una vez que se tuvieron los espectros de potencia, se calculó la potencia total, equivalente al área bajo la curva, por lo que se integró la densidad espectral de potencia empleando trapecios rectangulares para una mejor aproximación, donde las bases mayor y menor corresponden a la densidad espectral de potencia de un punto definido  $i$  y de el punto consecutivo  $i+1$ , y la altura es la diferencia en el vector de frecuencias. Y finalmente se realizó una suma de cada valor de potencia calculado hasta 0.0333 Hz, o en términos de período, a partir de los 30 días hasta el final de la serie. La potencia se expresa de la siguiente manera, donde  $P$  es la potencia,  $DSP$  la densidad espectral de potencia y  $f$  la frecuencia.

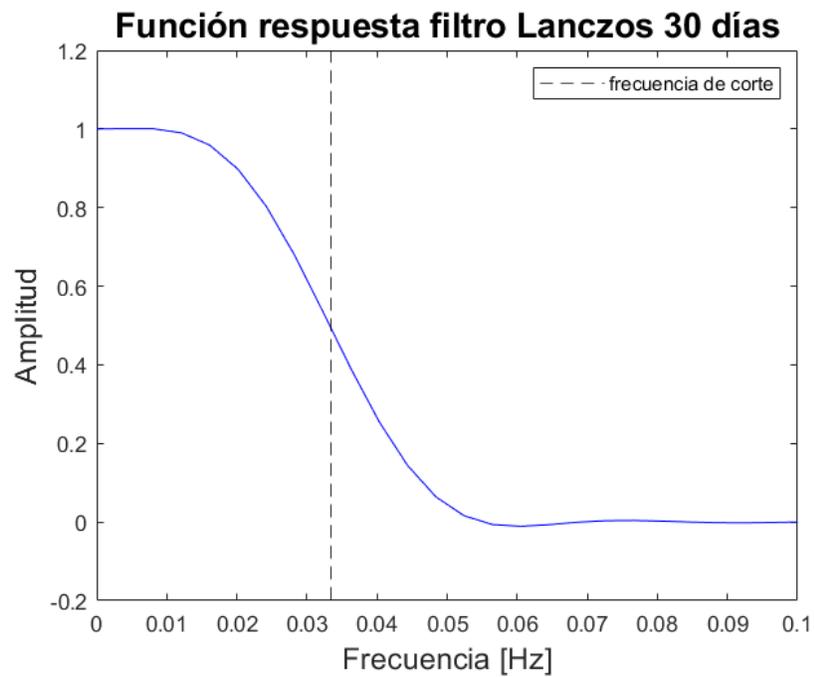


Figura 3.3: Función respuesta del filtro Lanczos pasa bajas con frecuencia de corte de 30 días (0.0333 Hz).

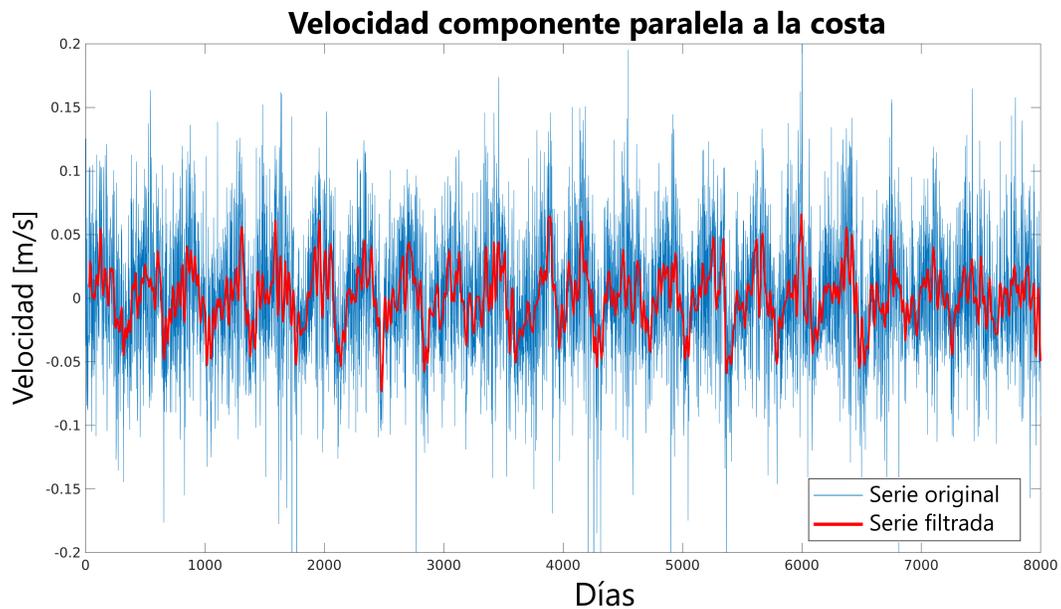


Figura 3.4: Comparación entre serie original y serie filtrada para la componente de velocidad paralela a la costa o *alongshore*.

$$P = \sum_{f=0}^{f=\frac{1}{30}} \frac{[DSP(f) + DSP(f + 1)] * [abs((f + 1) - f)]}{2},$$

También se aplicó el espectro rotatorio para ambos sistemas coordenados (capítulo 3, sección 3.3). Para este caso se calculó el coeficiente rotatorio en las frecuencias significativas a distintas profundidades en la columna de agua.

Para ambos procedimientos, análisis de Fourier y espectros rotatorios, se realizó el cálculo de la potencia total a distintas profundidades en la columna de agua de ambos espectros.

Finalmente, se revisaron todas las gráficas generadas y se presentaron aquellas con frecuencias características definidas, mostrando un resultado por cada plataforma continental. Las gráficas de los espectros se muestran en los Apéndices A y B.

# Capítulo 4

## Resultados

El objetivo de la tesis es cuantificar los cambios en la variabilidad de largo plazo de las corrientes oceánicas en las plataformas continentales del GdM, considerando dos experimentos asociados al forzamiento atmosférico. La identificación y contribución relativa de distintos forzamientos, como viento, ondas topográficas o confinamiento topográfico (Sansón et al. (2010); Zavala Sansón (2022)), están más allá del alcance de este trabajo y se dejan como investigación futura. En ese sentido, no se analizarán con detalle las causas de las diferencias entre la circulación oceánica resultante al no incluir o sí incluir forzamiento atmosférico, ya que ésta es multifactorial; y consecuentemente, no se realizarán análisis detallados de la variabilidad del campo de viento utilizado para forzar el experimento OBW-25. Un análisis completo y detallado que explore los orígenes de la variabilidad de largo plazo de las corrientes oceánicas debe incluir todos los forzamientos mencionados anteriormente, lo cual no está dentro de las características de una tesis de esta naturaleza.

## 4.1. Climatologías mensuales del viento y circulación oceánica

En esta sección se muestran tres climatologías mensuales: primero los valores promedio del esfuerzo del viento en la superficie marina, y por otro lado, los valores promedio de las corrientes oceánicas sin forzamiento atmosférico y otro para el experimento con forzamiento atmosférico. Las climatologías del esfuerzo del viento y de las corrientes oceánicas mostradas en esta sección deben verse como una guía y punto de partida para la descripción de los resultados y propuestas de investigación futura.

Para las corrientes oceánicas primero se promediaron los valores de velocidad de todas las profundidades para cada punto de malla para cada día y después se obtuvo la media del mismo día para todos los años, luego se promediaron todos los valores de los días de cada mes, obteniendo finalmente un sólo valor de velocidad para cada punto por mes. Aquellos puntos de malla más allá de la isóbata de los 200 m fueron removidos para analizar únicamente las plataformas continentales.

### 4.1.1. Esfuerzo del viento superficial

En la Figuras 4.1 y 4.6 se muestra la climatología mensual del esfuerzo del viento superficial en el GdM derivado de los datos de forzamiento atmosférico usados para el experimento OBW-25 descrito en el capítulo 3. De manera general se observan valores más altos del esfuerzo del viento en los primeros y últimos meses del año, desde enero hasta abril y de noviembre a diciembre. Por otro lado, de mayo a agosto se registran los valores más bajos. La dirección del viento es preferencialmente hacia el suroeste en todo el GdM en otoño e invierno, mientras que en la primavera y el verano el viento se dirige al oeste en el centro del GdM, entre los 23° y 26° de latitud. A partir de los -90° de longitud aproximadamente a longitudes menores, en el norte la dirección del esfuerzo se desplaza hacia el noroeste y en el sur la dirección es hacia el suroeste. De esta manera, el esfuerzo del viento casi siempre choca de manera perpendicular con la costa, excepto en el CB, con un comportamiento paralelo a la costa que se mantiene igual en los doce meses. A pesar de lo descrito anteriormente, hay un comportamiento diferente en septiembre y octubre, ya que en el verano se tienen valores bajos, en promedio  $0.01 N/m^2$ . Este comportamiento es igual en octubre y la climatología de septiembre es más parecida a los meses de invierno, donde hay valores mayores del esfuerzo ( $0.1 N/m^2$ ).

A continuación se describe de manera particular las características del esfuerzo del viento en cada una de las plataformas continentales. Para empezar, WFS es la plataforma con menor intensidad de esfuerzo del viento con magnitudes promedio de aproximadamente  $0.03 N/m^2$ ,

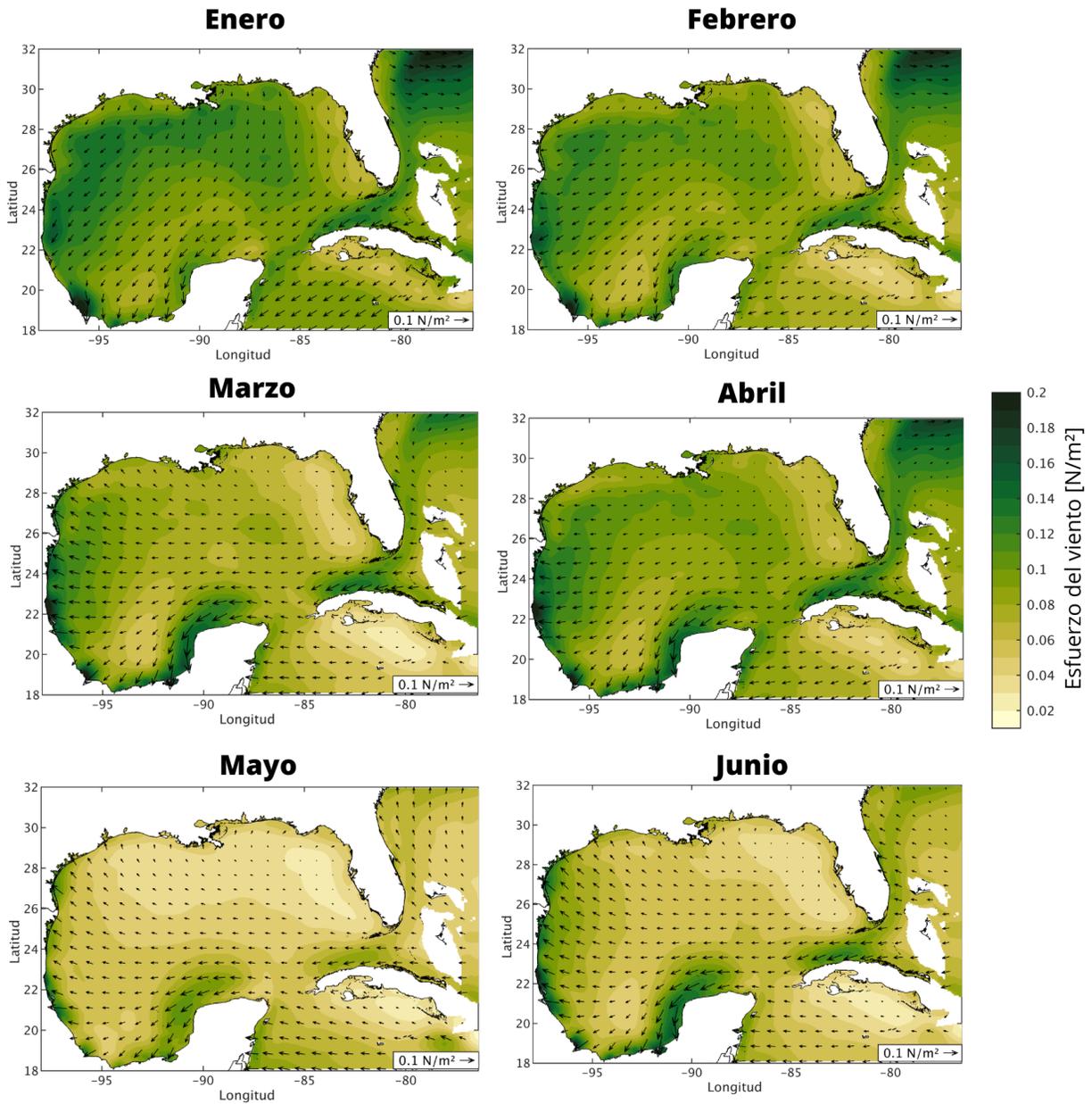


Figura 4.1: Climatología mensual del esfuerzo del viento superficial en el GdM de enero a junio.

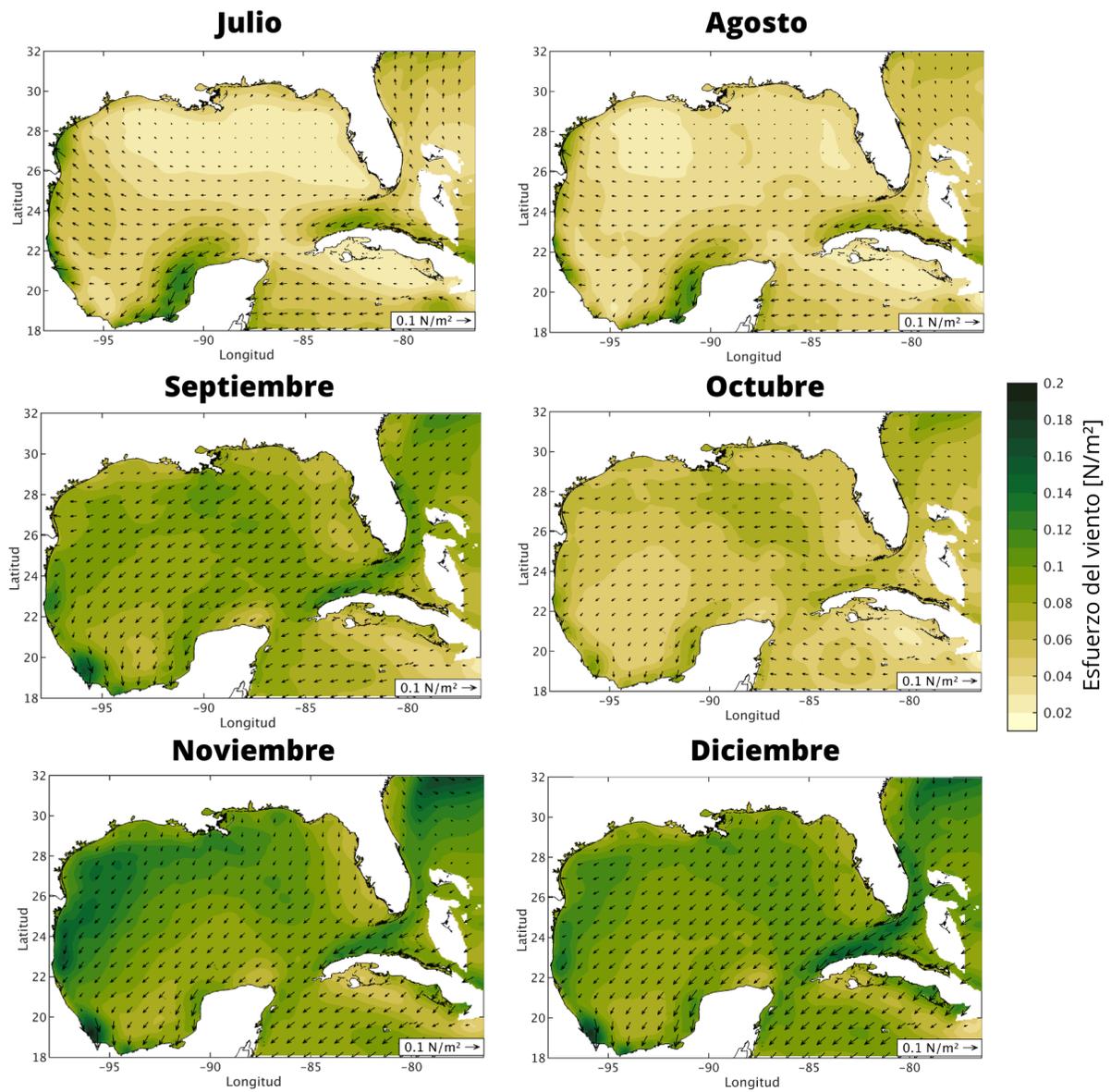


Figura 4.2: Climatología mensual del esfuerzo del viento superficial en el GdM de julio a diciembre.

como se observa, los vectores de velocidad son de menor intensidad, reduciéndose más en mayo y los meses de verano. De enero a junio el viento sopla de norte a sur a lo largo de la costa, en julio y agosto decrecientemente su intensidad, sin tener un comportamiento visible, y finalmente de septiembre a diciembre el viento proviene del continente atravesando la plataforma perpendicularmente. También en esta época se encuentran los valores máximos del esfuerzo para esta zona, con una magnitud promedio aproximada de  $0.1 N/m^2$ .

Para el caso de LATEX se puede dividir en dos zonas, la cercana a la frontera de México-EE.UU. y la frontera entre los estados estadounidenses de Texas-Luisiana. Para la primera zona se tiene una trayectoria del viento perpendicular a la costa en todo el año. Desde marzo hasta agosto la dirección del viento es hacia el noroeste (primavera y verano) y desde septiembre hasta febrero la dirección cambia hacia el suroeste. Esta zona al sur de la plataforma cuenta con una energía considerable a lo largo de todos los meses, con un promedio de  $0.08 N/m^2$  al año, no obstante, durante verano y otoño la energía se reduce a  $0.03 N/m^2$  aproximadamente. En contraste, para la segunda zona, desde septiembre hasta febrero la dirección del viento es hacia el suroeste, y de marzo a agosto es preferencialmente al norte. Desde mayo a agosto se registra una disminución notable del esfuerzo del viento, reduciéndose más en julio y agosto hasta  $0.02 N/m^2$ .

En TAVE se observa un comportamiento principalmente perpendicular a la costa en todo el año, con dirección noroeste en primavera y verano y dirección al suroeste en otoño e invierno. Octubre es el mes con menor energía ( $0.05 N/m^2$ ), sin embargo en el resto de los meses conserva prácticamente los mismos niveles del esfuerzo ( $0.14 N/m^2$ ). En la temporada de otoño e invierno se encuentran magnitudes mayores en la parte sur de la plataforma y asimismo el comportamiento del viento se vuelve paralelo a la costa, únicamente frente a las costas del sur de Veracruz, donde se aprecian dos vectores en  $20^\circ N, -96^\circ W$  de  $0.2 N/m^2$  de magnitud. Por otro lado, en la parte norte de la plataforma siempre se tiene una dirección del viento perpendicular a la costa.

Por último, en el CB se tiene únicamente un comportamiento paralelo a la costa de este a oeste todo el año. Cuenta con magnitudes mayores de aproximadamente  $0.11 N/m^2$  en los meses de primavera y verano, debido a que es la plataforma con mayor esfuerzo del viento, en otoño e invierno no disminuye significativamente su valor. En la región oeste del CB se tienen magnitudes altas del esfuerzo del viento durante todo el año, de aproximadamente  $0.13 N/m^2$ , mientras que en la región este se tiene una reducción en la magnitud del esfuerzo del viento durante primavera-verano. Octubre es el mes con la menor intensidad del esfuerzo del viento, con una magnitud promedio de  $0.06 N/m^2$ .

#### 4.1.2. Corrientes oceánicas en las plataformas

De igual manera que en la sección anterior, en las Figuras 4.3, 4.4 se ilustran las climatologías mensuales de las corrientes oceánicas en las plataformas continentales del GdM para el experimento sin forzamiento atmosférico y en las Figuras 4.5 y 4.6 para el experimento con

forzamiento atmosférico.

En la Figuras 4.3 y 4.4 se puede observar una circulación anticiclónica general a lo largo de todo el GdM, la cual se mantiene con muy poca variación a lo largo de todo el año.

Las corrientes con mayor intensidad se encuentran en la parte norte de TAVE, la plataforma externa de LATEX y la plataforma externa de WFS durante verano. WFS es la única plataforma que sí muestra variación para este experimento, en los meses de otoño se refleja una disminución en la magnitud de las corrientes. El BC es la plataforma con menor intensidad de la corriente, pero en la plataforma externa, al norte de Yucatán, se puede observar un remolino anticiclónico que se sigue conservando en el experimento con forzamiento atmosférico.

En contraste, para el experimento con forzamiento atmosférico (Figuras 4.5 y 4.6) se observan variaciones para cada mes del año, resultado del esfuerzo del viento en la región, con magnitud promedio de las corrientes de 9 cm/s. Primero, para WFS se tiene un sentido de las corrientes hacia el sur en todo el año, en la plataforma interna las corrientes tienen mayor magnitud durante otoño-invierno, con la menor magnitud a inicios de primavera (abril) y finales del verano (septiembre). En esta climatología no se observa un cambio en esta plataforma en la dirección de la corriente acorde con los resultados de Morey et al. (2005) y Zavala-Hidalgo et al. (2003), donde se mostró una inversión del sentido de la corriente hacia el norte durante el verano. Esto nos lleva a sugerir que falta mayor precisión en el campo del esfuerzo del viento en WFS, sobre todo en la zona de la plataforma interna, para reproducir adecuadamente la variación estacional de las corrientes.

Para la plataforma externa se observa la misma dirección de las corrientes hacia el sur, solamente en el mes de noviembre se produce un cambio de dirección hacia el norte. En la primavera esta zona tiene mayor magnitud que la plataforma interna, pero en el resto del año la plataforma interna suele tener mayor magnitud.

En LATEX, en la plataforma interna la circulación es hacia el oeste casi todo el año, la cual se debilita e invierte hacia el este de junio a agosto, meses en los cuales, la corriente se dirige de manera perpendicular a la costa. Por otro lado, en la plataforma externa durante todo el año la dirección preferencial de las corrientes es hacia el este y la magnitud se acentúa en verano principalmente aunque también en la primavera. De octubre a diciembre disminuye la magnitud de las corrientes hasta ser casi nula.

Para TAVE se muestran corrientes muy intensas a finales de la primavera y en el verano con una trayectoria exclusivamente hacia el norte, consistente con la dirección del esfuerzo del viento. En el resto del año disminuye la magnitud de las corrientes, y se muestra una dirección diferente en el norte y en el sur de la plataforma. En la primera zona la corriente va hacia el norte y en la segunda hacia el sur.

Por último, para el CB, la corriente se dirige al oeste con una magnitud alta casi todo el año, excepto durante septiembre y octubre, se reduce pero su dirección se mantiene. Las corrientes de mayor intensidad se presentan en esta plataforma y en la de TAVE.

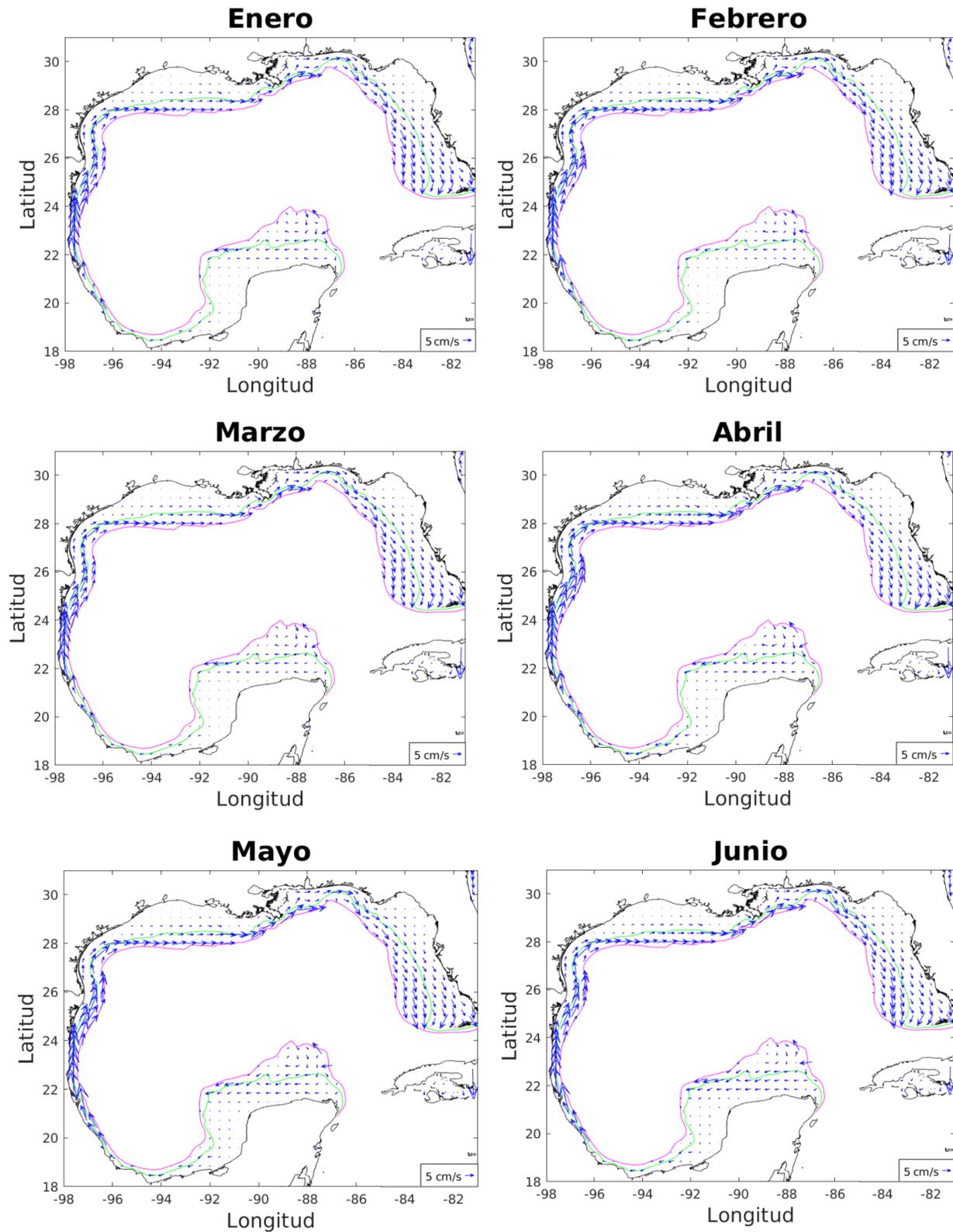


Figura 4.3: Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento sin forzamiento atmosférico de enero a junio. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m.

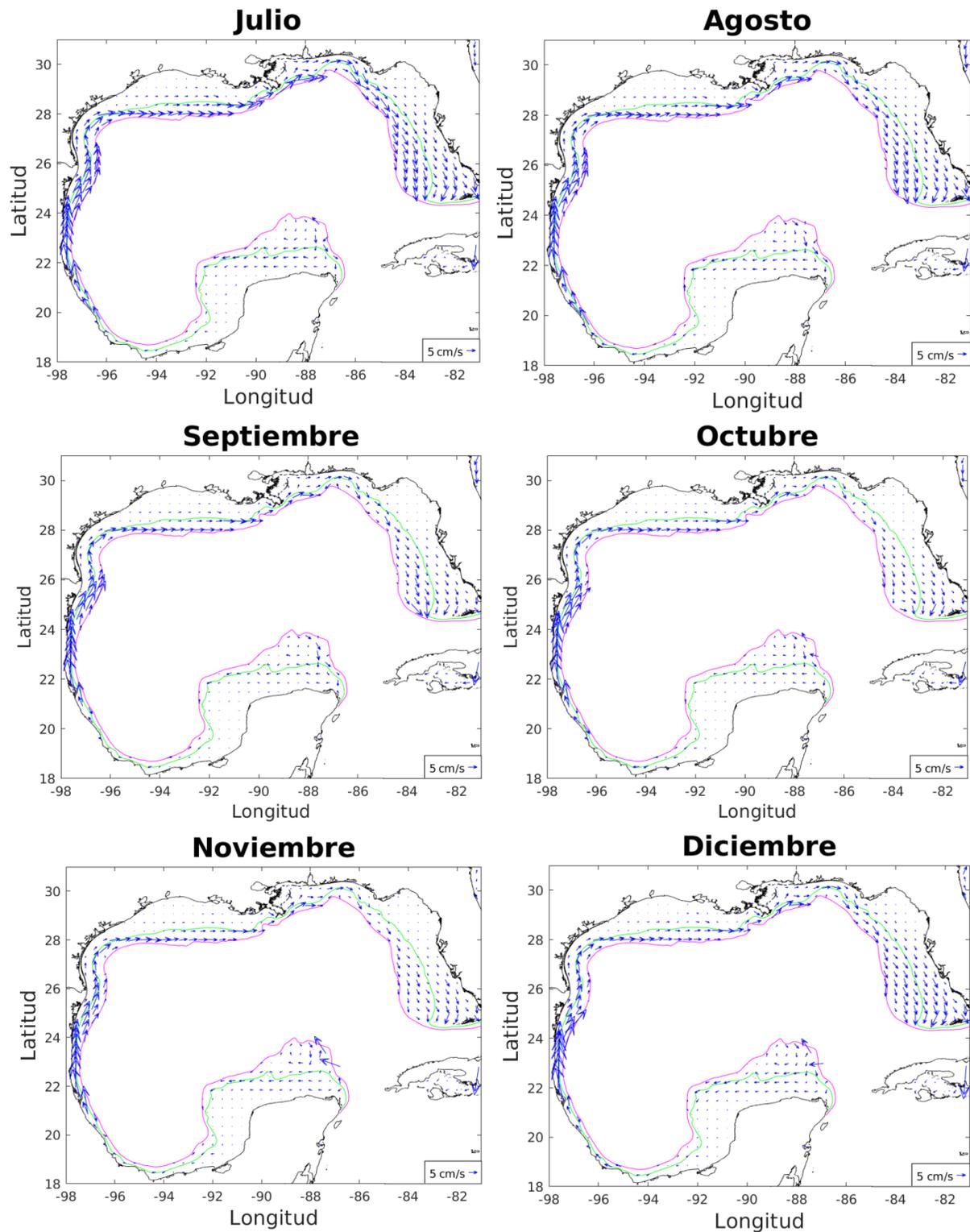


Figura 4.4: Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento sin forzamiento atmosférico de julio a diciembre. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m.

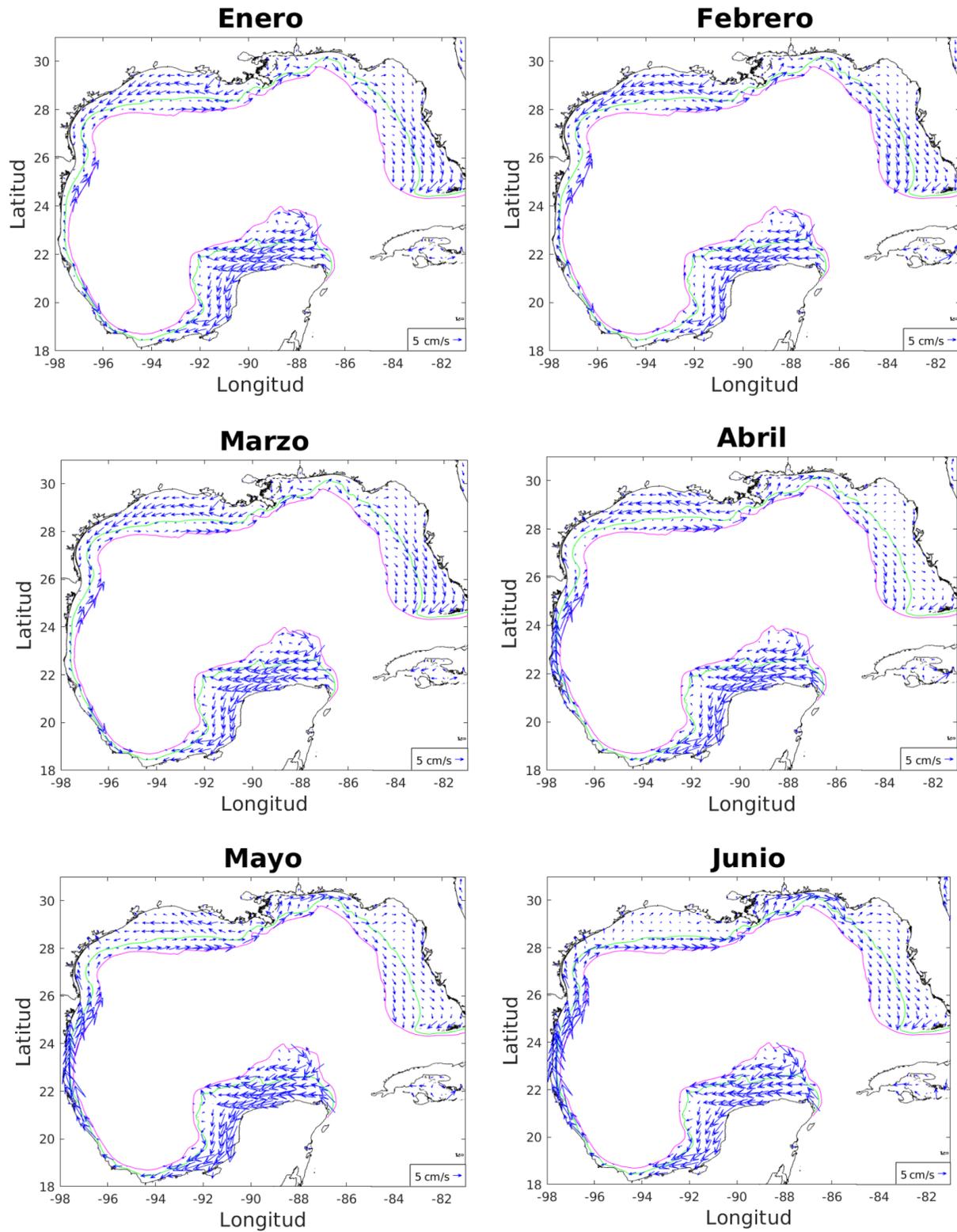


Figura 4.5: Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento con forzamiento atmosférico de enero a junio. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m.

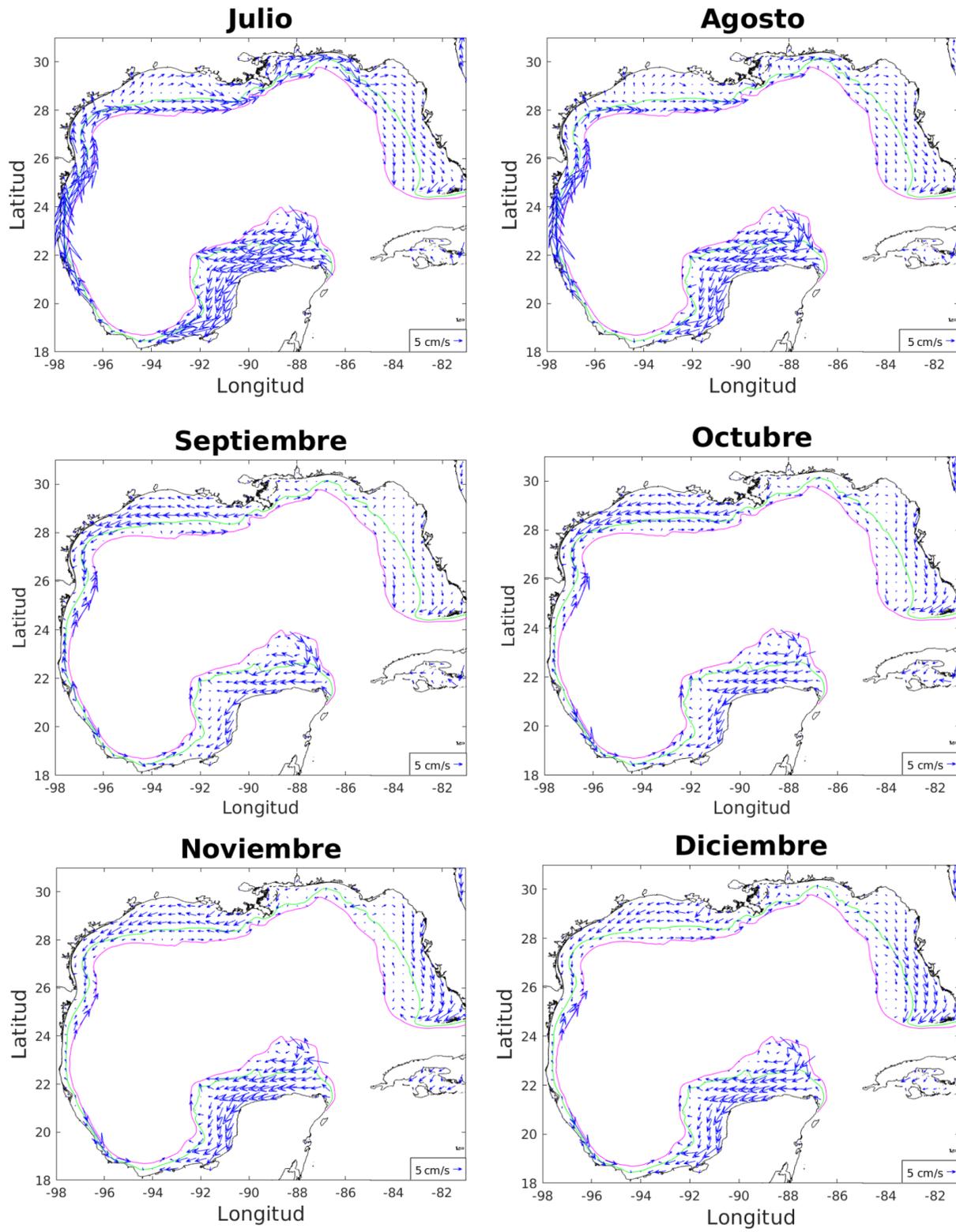


Figura 4.6: Climatología mensual de las corrientes marinas en las plataformas del GdM para el experimento con forzamiento atmosférico de julio a diciembre. La línea verde representa la isóbata de 50 m y la línea magenta la isóbata de 200 m.

## 4.2. Variabilidad de las corrientes oceánicas: análisis multianual

En esta sección se presenta un análisis de la variabilidad de largo plazo (bajas frecuencias) de las corrientes oceánicas en las plataformas continentales del GdM, que abarca todo el periodo de estudio, considerando todos los días de todos los años en una misma serie temporal. Se realizaron dos análisis por separado para las plataformas interna y externa, una se ubica en la isóbata de los 50 m y otra en la isóbata de los 200 m. Para diferentes puntos a lo largo de cada isóbata se obtuvieron tanto los perfiles verticales del coeficiente rotatorio, como los perfiles verticales de potencia, de esta manera se identificaron los periodos con más energía espectral y el comportamiento de la potencia espectral con la profundidad.

### 4.2.1. Plataforma interna

#### Periodos significativos

En las tablas 4.1 y 4.2 se muestran los valores de coeficiente rotatorio, la tabla 4.1 corresponde al experimento sin forzamiento atmosférico y la tabla 4.2 con forzamiento atmosférico. En ambas se representa el coeficiente en los periodos significativos, es decir, los periodos con mayor energía espectral para cada profundidad analizada. Los valores de los periodos significativos corresponden a los valores donde se localiza la máxima varianza espectral en las distintas bandas de frecuencia del espectro muestral (espectro crudo), por lo que los periodos significativos deben entenderse como representativos de una banda de frecuencia centrada alrededor de dichos valores. En la identificación de los periodos significativos no se usaron técnicas como multitaper o espectros replicados (Wilks (2011)), ya que la interpretación de los resultados no se ve afectada por esta consideración, además permite calcular la potencia total directamente del espectro muestral sin post-procesamientos adicionales.

Para el experimento sin forzamiento atmosférico se tienen ocho periodos diferentes en los puntos de evaluación, los cuales son: 186, 190, 362, 380, 399, 420, 469 y 614 días. Debido a la aplicación de la transformada de Fourier y a su resolución temporal, se tiene que varios de los periodos encontrados están asociados a las variaciones estacionales y anuales: los periodos de 181 y 185 días están asociados con el periodo semianual y el periodo de 362 días con las variaciones anuales.

Realizando una breve descripción para cada plataforma comenzando con la WFS (puntos 1 y 2) aparecen los periodos de 362 y 419 días, donde el primero es consistente en todas las profundidades para el punto 2. En LATEX (puntos 3 y 4) se registra la mayor cantidad de

Cuadro 4.1: Coeficientes rotarios de los periodos significativos en distintos puntos a largo de la isóbata de 50 m. Experimento sin forzamiento atmosférico.

Plataforma	Punto	Profundidad (m)	Periodo (días)							
			186	190	362	380	399	420	469	614
WFS	1	0	-	-	-	-	-	0.70	-	-
		20	-	-	-	-	-	0.81	-	-
		40	-	-	0.60	-	-	-	-	-
	2	0	-	-	0.31	-	-	-	-	-
		20	-	-	0.54	-	-	-	-	-
		40	-	-	0.61	-	-	-	-	-
LATEX	3	0	-	-	-	-0.86	-	-	0.66	-
		20	-	-	-	-0.78	-	-	0.81	-
		40	-	-	-0.33	-	-	-	0.93	-
	4	0	0.30	-	-	-	0.21	-	-	-
		20	0.75	-	-	-	0.20	-	-	-
		40	0.70	-	0.45	-	-	-	-	-
TAVE	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		20	-	-	-	-	-	-	-	-
		40	-	-	-	-	-	-	-	-
CB	6	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		20	-	-	-	-	-	-	-	-
		40	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	0	-	-	-	-	-	-	-	0.88
		20	-	-	-	-	-	-	-	0.90
		40	-	-	-	-	-	-	-	0.86
8	0	-	0.44	-	-	-	-	-	-	
	20	-	0.35	-	-	-	-	-	-	
	40	-	0.51	-	-	-	-	-	-	

Cuadro 4.2: Coeficientes rotarios de los periodos significativos en diferentes puntos a lo largo de la isóbata de 50 m. Experimento con forzamiento atmosférico.

Plataforma	Punto	Profundidad (m)	Periodo (días)		
			181	242	362
WFS	1	0	-0.70	-	0.38
		20	-0.69	-	-0.47
		40	-	-	-0.66
	2	0	0.31	-	-
		20	-	-0.36	-
		40	-	0.08	-
LATEX	3	0	-0.13	-	-0.33
		20	-	-	0.38
		40	-	-	-0.17
	4	0	-	-	0.08
		20	-	-	0.18
		40	-	-	0.13
TAVE	5	0	-	-	0.53
		20	-	-	0.45
		40	-	-	0.89
CB	6	0	-0.47	-	-0.52
		20	-0.45	-	-0.64
		40	-0.88	-	-0.88
	7	0	-	-	0.84
		20	-	-	0.07
		40	-	-	-0.73
8	0	-	-	-0.63	
	20	-	-	-0.19	
	40	-	-	-0.63	

periodos, entre los cuales se encuentran 186, 362, 380, 399 y 469 días. Para el punto 3 a los 469 días se mantiene el periodo de 469 días en todas las profundidades y para el punto 4 el periodo de 186 días es consistente en toda la columna de agua. En el punto 5 en TAVE, así como el punto 6 en la Bahía de Campeche en el CB no se logró identificar ningún periodo significativo, los espectros para ambos puntos son demasiado ruidosos y ningún periodo destaca. Por último, en los puntos 7 y 8 en el CB se tienen solamente dos periodos: 190 y 614 días, los cuales son consistentes en todas las profundidades.

Para el experimento con forzamiento atmosférico sólo se tienen tres periodos registrados: 181, 242 y 362 días. La WFS es la única plataforma en la que se tienen los tres periodos, aunque el periodo anual (362 días) es el único que es consistente en todas las profundidades. Para el resto de las plataformas sigue siendo el periodo anual el único periodo significativo, a excepción del punto 6 en la zona de la Bahía de Campeche en el BC donde también se encuentra el periodo de 181 días.

Resumiendo, cuando no hay forzamiento atmosférico en el experimento se observa que hay una mayor cantidad de periodos significativos asociados y en su mayoría no son consistentes en todas las profundidades, mientras que con forzamiento atmosférico la energía se concentra principalmente en los periodos anual y semianual, donde el primero es consistente en todos los puntos de evaluación. La transferencia vertical de momento horizontal asociada al esfuerzo del viento se extiende a lo largo de toda la columna de agua, provocando que la variabilidad temporal a lo largo de la vertical esté en sintonía con aquella asociada al viento.

### Perfiles verticales del coeficiente rotatorio

Como se comentó, algunos periodos no se observan en todos los niveles de profundidad, así que para el cálculo de los perfiles verticales del coeficiente rotatorio sólo se usaron aquellos periodos consistentes en todas las profundidades. Dichos resultados se presentan en la Figura 4.7, donde el estilo de línea define el periodo de interés, entre paréntesis se señala el punto de evaluación y el color se asocia a cada plataforma: rojo para WFS, verde para LATEX, amarillo para TAVE y azul para CB.

Los resultados del experimento sin forzamiento atmosférico demuestran claramente un comportamiento homogéneo en todas las profundidades para todos los puntos de evaluación, indicando corrientes con rotación antihoraria intensa. En contraste, en el experimento con forzamiento atmosférico se tiene que la naturaleza rotatoria del flujo cambia a lo largo de todo el GdM, con variaciones importantes en la profundidad en ciertos puntos para el periodo anual, donde las corrientes cambian de rotación horaria intensa en superficie a rotación antihoraria en la profundidad. A continuación se describen los resultados para cada plataforma continental.

#### - WFS

En la WFS se señala el periodo anual para ambos experimentos, aunque en el caso sin forzamiento atmosférico corresponde al punto 2 con una rotación horaria en todas las profundidades. En el experimento con forzamiento atmosférico, para el punto 1 se tiene una rotación

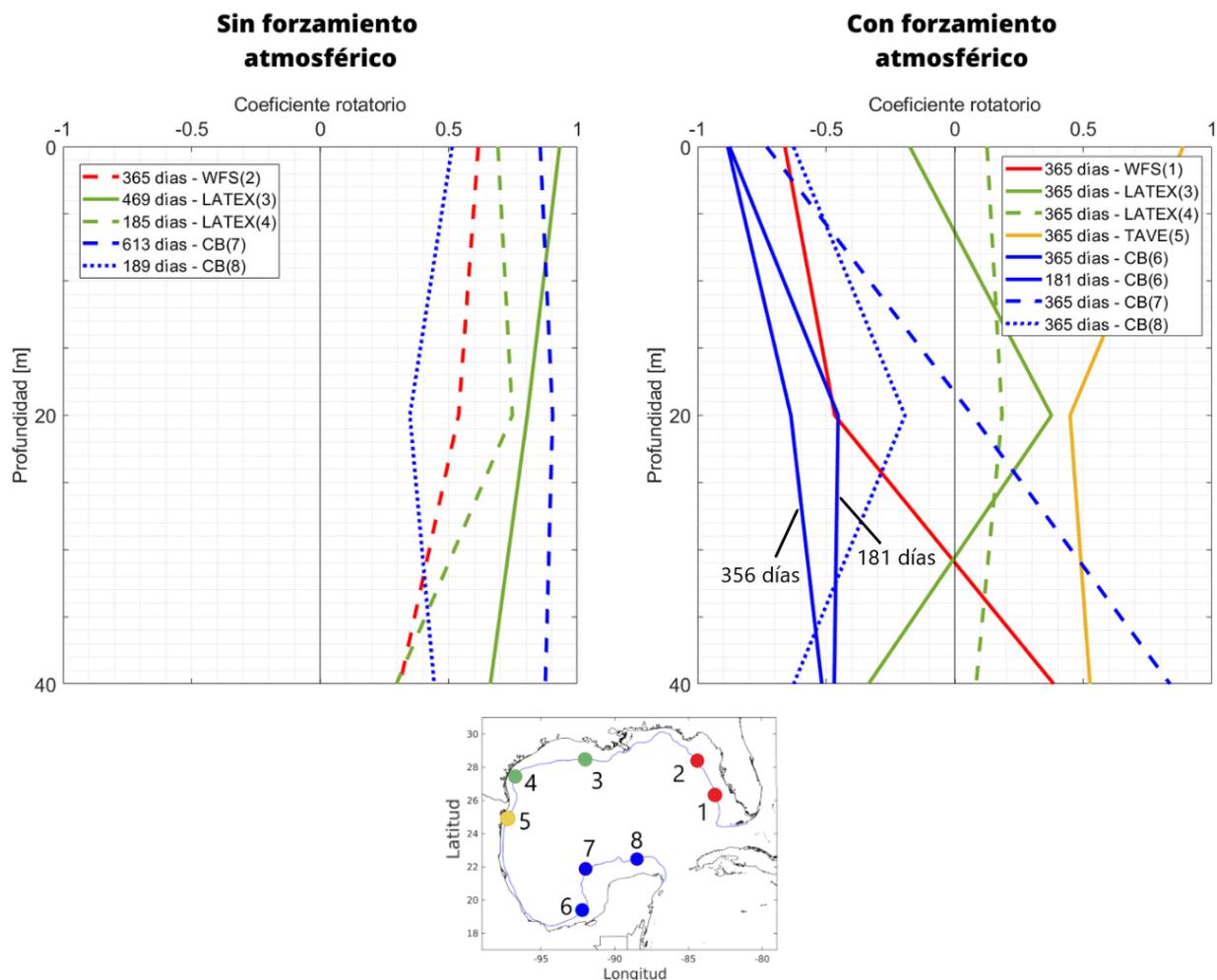


Figura 4.7: Perfiles verticales del coeficiente rotatorio de la velocidad en el sistema alineado con la batimetría para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 50 m en los periodos consistentes en todas las profundidades.

horaria hasta los 30 m aproximadamente, profundidad a la cual pasa a ser antihoraria.

- LATEX

En la plataforma LATEX, en el experimento sin forzamiento atmosférico los periodos son 469 días para el punto 3 y 185 días para el punto 4. El primero refleja valores cuasi constantes del coeficiente rotatorio, aunque a grandes rasgos el sentido de rotación en ambos periodos presenta una tendencia antihoraria.

En el caso con forzamiento atmosférico se presenta el periodo anual para ambos puntos de evaluación (3 y 4). Para el primero, la rotación en superficie es horaria, aunque con valor cercano a cero, a los 20 m se invierte el sentido de giro hacia un comportamiento antihorario y a los 40 m regresa a ser horario. Para el segundo punto en todas las profundidades se tiene un sentido antihorario, el comportamiento es homogéneo.

- TAVE

En TAVE, para el experimento sin forzamiento atmosférico no hay periodos significativos, para el experimento con forzamiento atmosférico hay un sólo periodo, correspondiente al periodo anual en el punto 5, el cual tiene una rotación antihoraria intensa en superficie, la cual después se debilita con la profundidad, manteniendo casi el mismo valor de coeficiente rotatorio a partir de los 20 m hasta los 40 m.

- CB

En el CB hay dos periodos en el experimento sin forzamiento atmosférico, 613 y 189 días en los puntos de evaluación 7 y 8 respectivamente, el primero en el escarpe de la Bahía de Campeche y el segundo frente a las costas de Yucatán. La rotación es intensa y antihoraria en todas las profundidades para ambos periodos.

Para el experimento con forzamiento atmosférico hay dos periodos significativos: 365 días en los puntos 6, 7 y 8; y 181 días para el punto 6. Para el periodo anual en el punto 7 se tiene una rotación horaria intensa en superficie, a los 20 metros presenta movimiento rectilíneo y a los 40 metros se vuelve antihorario. Para el resto de los periodos señalados se observan corrientes con rotación horaria intensa en todas las profundidades, con variaciones pequeñas del coeficiente rotatorio.

## Perfiles verticales de potencia espectral

Estas gráficas nos permiten identificar cuál componente de la velocidad presenta la mayor variabilidad de largo plazo a diferentes profundidades. La potencia del periodograma es una medida de la energía contenida en una cierta banda de frecuencia y no una medida de la intensidad de las corrientes.

Los perfiles verticales de potencia de las componentes alongshore y cross-shore de la velocidad para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 50 m se muestran en la Figura 4.8. Para el experimento sin forzamiento atmosférico se observa que en todas las plataformas continentales del GdM, excepto el CB, se tiene poca potencia en la componente paralela a la isóbata o *alongshore* en toda la columna de agua. Para la componente perpendicular a la isóbata o *cross-shore* la potencia es diez veces mayor que para la componente paralela, con

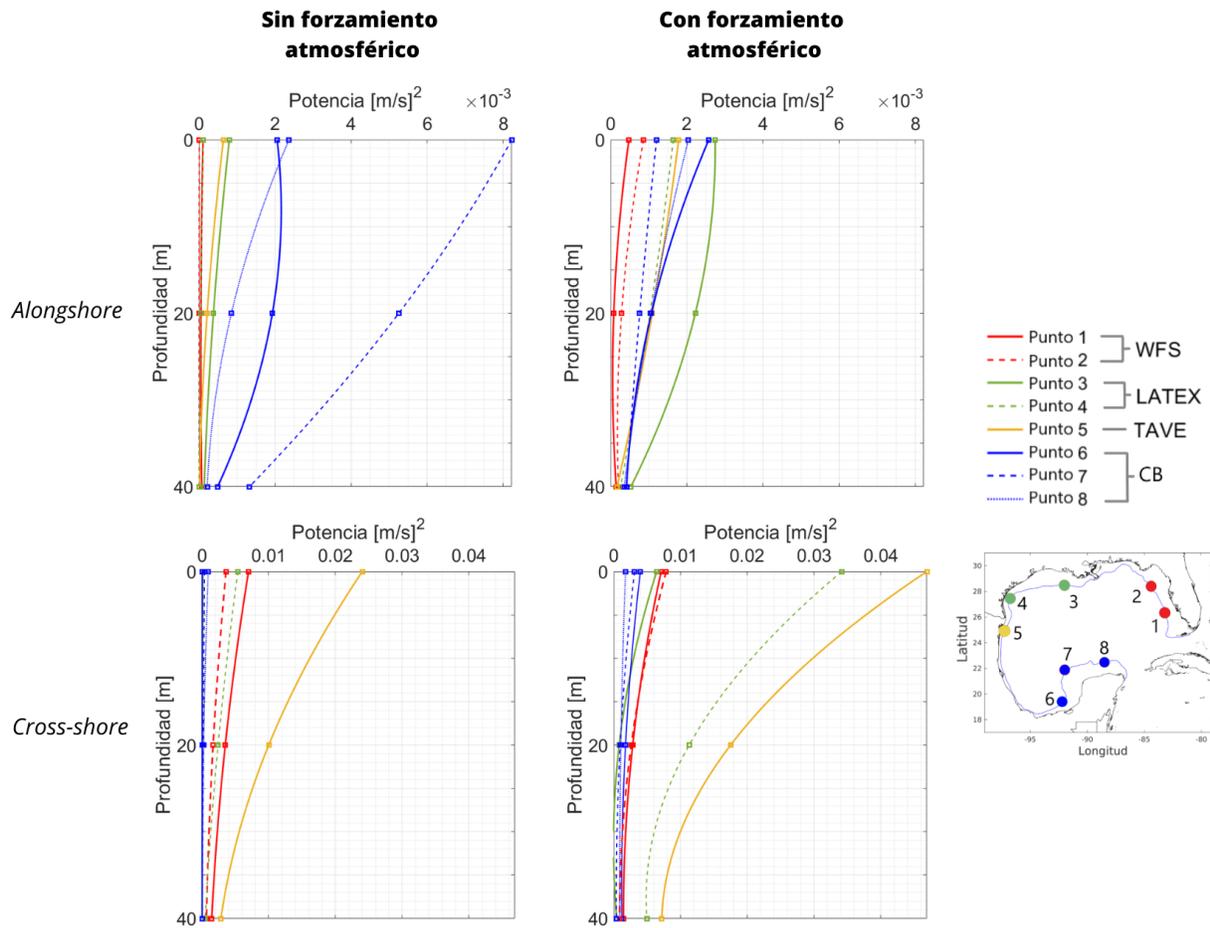


Figura 4.8: Perfiles verticales de potencia espectral de las componentes *alongshore* y *cross-shore* de la velocidad para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 50 m.

un valor cuasi-constante en toda la columna de agua. En TAVE se tiene mayor potencia en comparación con las demás plataformas, con una reducción importante desde la superficie a la base de la columna de agua. Estos resultados indican que la variabilidad de largo plazo de las corrientes en la plataforma interna está concentrada en la componente *cross-shore*. A continuación se describen las características particulares de la potencia del periodograma para cada plataforma continental, considerando el efecto que tiene el forzamiento atmosférico en la variabilidad de largo plazo.

#### - WFS

No se presentan cambios significativos en la potencia entre ambos experimentos y es la plataforma continental con menos potencia en la componente *alongshore*. El forzamiento atmosférico incrementa levemente la energía contenida en las bajas frecuencias de la componente *alongshore* de la velocidad.

Hablando de la componente *cross-shore*, WFS es la segunda plataforma con menor poten-

cia después de CB. El forzamiento atmosférico incrementa levemente la potencia contenida en bajas frecuencias, para el experimento sin forzamiento atmosférico el punto de evaluación 1 tiene mayor potencia que el 2, y para el experimento con forzamiento atmosférico ambos puntos obtienen el mismo nivel de potencia.

- LATEX

Para la componente *alongshore*, el caso más destacable recae en el punto 3, en el límite este de la plataforma, próximo al estado de Luisiana, donde la energía contenida en bajas frecuencias es muy baja sin forzamiento atmosférico, sin embargo, con forzamiento atmosférico es el punto de evaluación con mayor potencia, con un valor de  $2,78 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  en superficie y el único con un decaimiento lento con la profundidad. Para el punto 4, el forzamiento atmosférico produce un incremento apreciable en la potencia.

Para la componente *cross-shore*, el punto 4, cercano a la frontera con México, refleja un nivel más alto de potencia que el punto 3 para ambos experimentos. Para el experimento sin forzamiento atmosférico el valor de la potencia es de  $5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  y con forzamiento atmosférico aumenta siete veces, teniendo  $34 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ . En LATEX, el forzamiento atmosférico induce un incremento notorio en la energía contenida en bajas frecuencias en ambas componentes de la velocidad.

- TAVE

Para TAVE, sólo se tiene el punto 5 como punto de evaluación. En el experimento sin forzamiento atmosférico el valor de la potencia para la componente *alongshore* es bajo, cercano a  $0,6 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  para todas las profundidades y para el experimento con forzamiento atmosférico el valor aumenta a  $2 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ , es decir, tres veces su valor.

Por otro lado, para la componente *cross-shore*, es el sitio con más potencia de entre todos los demás en ambos experimentos, con forzamiento atmosférico incrementa al doble de su valor, de  $25 \times 10^{-3}$  a  $45 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ .

- CB

Referente a la componente *alongshore*, en los puntos 6 y 8 no se visualiza un cambio importante en la potencia entre ambos experimentos. Para el punto 7, ubicado en el escarpe de la Bahía de Campeche, hay mayor energía en bajas frecuencias para el experimento sin forzamiento atmosférico ( $8 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  en superficie), siendo el punto más energético, mientras que con forzamiento atmosférico el valor disminuye a un cuarto de su valor ( $2 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ ). Sin forzamiento atmosférico el decaimiento de potencia para los puntos 6 y 8 es muy lento, mientras que para el punto 8 es cuasi-lineal. Para el experimento con forzamiento atmosférico el decaimiento en potencia es menos abrupto para los tres puntos.

Respecto a la componente *cross-shore*, el forzamiento atmosférico produce un leve incremento en la potencia en todos los puntos de evaluación. En ambos experimentos, para todas las profundidades, el valor de la potencia es prácticamente el mismo, esto lo convierte en la plataforma con menos energía en bajas frecuencias para dicha componente.

En resumen, la potencia en cada componente de velocidad está asociada con el esfuerzo del viento en el experimento con forzamiento atmosférico. En LATEX y TAVE hay mayor potencia en la componente *cross-shore*, lo que coincide con las climatologías mensuales del

esfuerzo del viento descritas en el capítulo 6, cuya dirección preferencial a lo largo del año es perpendicular a la costa. Para el caso de la componente *alongshore*, la zona este de LATEX es la que presenta mayor potencia, aunque en la climatología del esfuerzo del viento es variable, presenta una dirección paralela a la costa alrededor de cinco meses al año. Otra plataforma cuya potencia es la mayor en la componente *alongshore* es el CB para el experimento sin forzamiento atmosférico, sin embargo, la potencia disminuye con forzamiento atmosférico, es decir, éste reduce la variabilidad de baja frecuencia, a pesar que la climatología del esfuerzo del viento demostró un comportamiento paralelo a la costa durante los doce meses. Un análisis más detallado de este comportamiento merece ser llevado a cabo, pero esto queda fuera del alcance de la tesis y se deja para estudios posteriores.

### 4.2.2. Plataforma externa

#### Periodos significativos

En las tablas 4.3 y 4.4 se muestran los valores de coeficiente rotatorio, la tabla 4.3 corresponde al experimento sin forzamiento atmosférico y la tabla 4.4 con forzamiento atmosférico. Como se mencionó en la sección de análisis de plataforma interna, en ambas se representa el coeficiente de los periodos significativos para cada profundidad analizada.

Para el experimento sin forzamiento atmosférico se tienen dieciseis periodos significativos, los cuales son: 105, 123, 150, 163, 194, 199, 204, 221, 235, 257, 319, 362, 420, 443, 498 y 570 días. En MAFLA se tiene desde la superficie hasta los 100 m en profundidad el periodo anual y a partir de los 120 m hasta el fondo marino los periodos de 204 y 420 días. En el punto 2 en LATEX se tienen dos periodos, 257 y 420 días; mientras en el punto 3 se tienen los periodos de 150 y 362 días, ambos periodos en ambos puntos son consistentes en toda la columna de agua. En TAVE se presentan la mayor cantidad de periodos, con doce en total, indicando que en esta plataforma las corrientes tienen mayor variabilidad en comparación con las corrientes en las otras plataformas. En el punto 4 el periodo de 498 días es consistente en toda la columna de agua, en el punto 6 el periodo consistente corresponde a los 319 días y en el punto 7 corresponde a 204 días. Finalmente, en el CB sólo el punto 8 tiene periodos significativos, sin embargo, a partir de los 100 m el espectro es muy ruidoso y no se aprecia ningún periodo con más energía que el resto.

Para el experimento con forzamiento atmosférico se tienen nueve periodos diferentes, los cuales son: 60, 105, 135, 150.5, 199, 221, 257, 362 y 399 días, por lo que el viento limita la variabilidad de las corrientes en las plataformas continentales. En MAFLA se tiene el periodo de 221 días, en LATEX se encuentran los periodos de 257 y 362 días. En TAVE los periodos significativos son 105, 135, 150, 257, 362 y 399 días, ninguno consistente en toda la columna de agua, excepto el periodo anual en el punto 6.

En esta plataforma se observa que en los puntos 4, 5 y 7 el periodo anual es significativo

Cuadro 4.3: Coeficientes rotarios de los periodos significativos en distintos puntos a largo de la isóbata de 200 m. Experimento sin forzamiento atmosférico.

Plataforma	Punto	Profundidad (m)	Periodos (días)			Plataforma	Punto	Profundidad (m)	Periodos (días)			
			204	362	420				194	221	443	
MAFLA	1	0	-	0	-	5	0	-	0.45	-0.46		
		20	-	-0.03	-		20	0.43	-	-0.40		
		40	-	-0.10	-		40	0.45	-	-0.35		
		60	-	-0.19	-		60	0.52	-	-0.33		
		80	-	-0.27	-		80	0.55	-	-0.32		
		100	-	-0.24	-		100	-	0.02	-		
		120	-0.25	-	-		120	-	0.05	-		
		140	-0.29	-	-		140	-	0.07	-		
		160	-0.25	-	-0.56		160	-	0.04	-		
		180	-0.13	-	-0.65		180	-	-	-		
			257	420				123	163	199	319	
LATEX	2	0	0.29	-0.29	TAVE	6	0	-	-0.21	-	0.63	
		20	0.27	-0.19			20	-	-0.25	-	0.64	
		40	0.29	0.02			40	-	-0.30	-	0.67	
		60	0.27	0.25			60	-0.72	-0.32	0.08	0.70	
		80	0.19	0.44			80	-0.71	-0.36	0.14	0.72	
		100	0.12	0.49			100	-0.70	-0.36	0.19	0.75	
		120	0.07	0.45			120	-0.70	-0.38	0.19	0.74	
		140	0.04	0.42			140	-0.67	-0.31	0.22	0.73	
		160	0.01	0.37			160	-0.64	-0.29	0.23	0.78	
		180	-0.23	0.53			180	-0.75	-0.25	0.16	0.81	
			150	362				204				
LATEX	3	0	0.81	0.44	7	0	0.41					
		20	0.73	0.69		20	0.20					
		40	0.43	0.91		40	-0.15					
		60	0.18	0.86		60	-0.35					
		80	0.08	0.68		80	-0.44					
		100	0.07	0.47		100	-0.46					
		120	0.07	0.31		120	-0.35					
		140	0.07	0.19		140	-0.28					
		160	-0.10	0.03		160	-0.31					
		180	-0.31	-0.08		180	-0.29					
			105	235	420	498				194	362	570
TAVE	4	0	-	0.84	0	-0.90	CB	8	0	0.52	0.47	0.33
		20	-	0.82	-0.01	-0.90			20	0.52	0.43	0.32
		40	-	0.79	-0.02	-0.91			40	0.49	0.39	0.35
		60	-	0.76	-0.03	-0.90			60	0.47	0.35	0.38
		80	-	0.76	-0.06	-0.88			80	0.45	0.36	0.41
		100	-	0.74	-0.08	-0.89			100	0.48	0.38	0.45
		120	0.74	-	-	-0.90			120	-	-	-
		140	0.72	-	-	-0.89			140	-	-	-
		160	0.63	-	-	-0.83			160	-	-	-
		180	-	-	-	-0.68			180	-	-	-

Cuadro 4.4: Coeficientes rotarios de los periodos significativos en distintos puntos a largo de la isóbata de 200 m. Experimento con forzamiento atmosférico.

Plataforma	Punto	Profundidad (m)	Periodos (días)		Plataforma	Punto	Profundidad (m)	Periodos (días)	
			<i>221</i>					<i>150</i>	<i>362</i>
MAFLA	1	0	-	-	TAVE	6	0	-	-0.71
		20	-	-			20	-	-0.50
		40	-	-			40	-	-0.72
		60	-	-			60	-	-0.73
		80	-	-			80	-	-0.60
		100	0.53	-			100	-	-0.31
		120	0.66	-			120	-	-0.15
		140	0.74	-			140	0.39	-0.17
		160	0.68	-			160	0.44	-0.35
180	0.38	-	180	0.59	-0.45				
			<i>362</i>					<i>104</i>	<i>362</i>
LATEX	2	0	-	-	TAVE	7	0	-	-0.89
		20	-	-			20	-	-0.64
		40	-	-			40	-	-0.86
		60	-	-			60	-	-0.71
		80	-	-			80	0.64	-
		100	-	-			100	0.57	-
		120	-0.38	-			120	0.41	-
		140	-0.62	-			140	0.35	-
		160	-0.62	-			160	0.44	-
180	-0.83	-	180	-	-				
			<i>257</i>	<i>362</i>				<i>60</i>	<i>362</i>
	3	0	-0.64	-	CB	8	0	-	-0.69
		20	-0.64	-			20	-	0.4
		40	-0.82	-			40	-	-0.79
		60	-	-			60	-	-0.79
		80	-	-			80	-0.84	0
		100	-	-			100	-0.40	0.05
		120	-0.70	0.60			120	0.07	0.21
		140	-0.76	0.94			140	0.36	0.36
		160	-0.74	0.92			160	0.39	0.75
180	-0.69	0.23	180	0.45	0.54				
			<i>257</i>	<i>399</i>				<i>362</i>	
TAVE	4	0	-	-	TAVE	10	0	-	-
		20	-	-0.82			20	-	-
		40	-	-0.88			40	-	-
		60	-	-0.88			60	-	-
		80	-	-0.84			80	-	-
		100	-0.52	-0.82			100	-0.43	-
		120	-0.60	-			120	-0.26	-
		140	-0.61	-			140	-0.20	-
		160	-0.60	-			160	-0.18	-
180	-0.30	-	180	0.03	-				
			<i>135</i>	<i>199</i>	<i>362</i>				
	5	0	-	-	0.25				
		20	-	-	0.35				
		40	-	-	0.42				
		60	-	-	0.48				
		80	-	-	0.46				
		100	-0.48	-0.18	-				
		120	-0.59	-0.22	-				
		140	-0.59	-0.20	-				
		160	-0.39	-0.15	-				
180	-0.18	-0.11	-						

desde la superficie hasta los 60-80 m de profundidad y en el resto de las profundidades hasta el fondo marino se traslada a un periodo diferente más corto.

En el CB. en los puntos 8 y 9 se tienen los periodos significativos de 60 y 362 días, este último es consistente en todas las profundidades en el punto 8. En el punto 9, en el escarpe de la Bahía de Campeche, no hay ningún periodo significativo.

Igual que en el análisis descrito en el apartado de la plataforma interna, en el experimento sin forzamiento atmosférico hay mayor cantidad de periodos y en su mayoría no son consistentes, mientras que en el experimento con forzamiento atmosférico el único periodo consistente es el anual. Esto difiere de la plataforma interna, en donde los periodos anual y semianual eran significativos.

### Perfiles verticales de coeficiente rotatorio

Al igual que en el análisis para la plataforma interna, aquí sólo se muestran los perfiles verticales del coeficiente rotatorio para aquellos periodos consistentes en todas las profundidades. Para los perfiles de coeficiente rotatorio, MAFLA es la única plataforma en la que no se pudieron observar periodos consistentes, por lo que no se describirá, el CB cuenta con uno, TAVE con cinco y LATEX con uno. La isóbata de 200 m está más cercana a la línea de costa en la plataforma TAVE que en las otras plataformas, por lo que el esfuerzo del viento tiene un rol muy importante como forzamiento de las corrientes oceánicas, esta es la razón por la cual en TAVE se tienen más periodos consistentes en todas las profundidades. Los resultados para ambos experimentos se muestran en la Figura 4.9, en conjunto con una descripción para cada plataforma continental.

#### - LATEX

Solo hay un periodo de interés, el cual se visualiza únicamente en el experimento sin forzamiento atmosférico, corresponde al periodo anual y se presenta en el punto de evaluación 3. En superficie prácticamente no tiene dirección de giro preferencial, se ve más definido por un movimiento rectilíneo, pero a mayor profundidad a partir de los 40 m incrementa el coeficiente rotario con una rotación antihoraria, alcanzando su valor máximo a los 140 m (0.9) y posteriormente se reduce el valor del coeficiente hasta 0.4, manteniendo su sentido de rotación.

#### - TAVE

En el experimento sin forzamiento atmosférico se tienen cuatro periodos de interés en tres puntos de evaluación. Para el punto 4 el periodo de 450 días, para el punto 6 los periodos de 162 y 319 días, y para el punto 7 el periodo de 204 días. Tres de estos perfiles son homogéneos en todas las profundidades, los cuales son las de 450, 319 y 162 días. El perfil de 319 días presenta un valor positivo de coeficiente rotatorio, asociado a una rotación antihoraria y las de 450 y 162 presentan un coeficiente rotatorio negativo, asociados con una rotación horaria. Para el caso del periodo de 204 días, la curva demuestra que desde la superficie hasta los 140 m se da una rotación horaria moderada que se vuelve antihoraria en la profundidad.

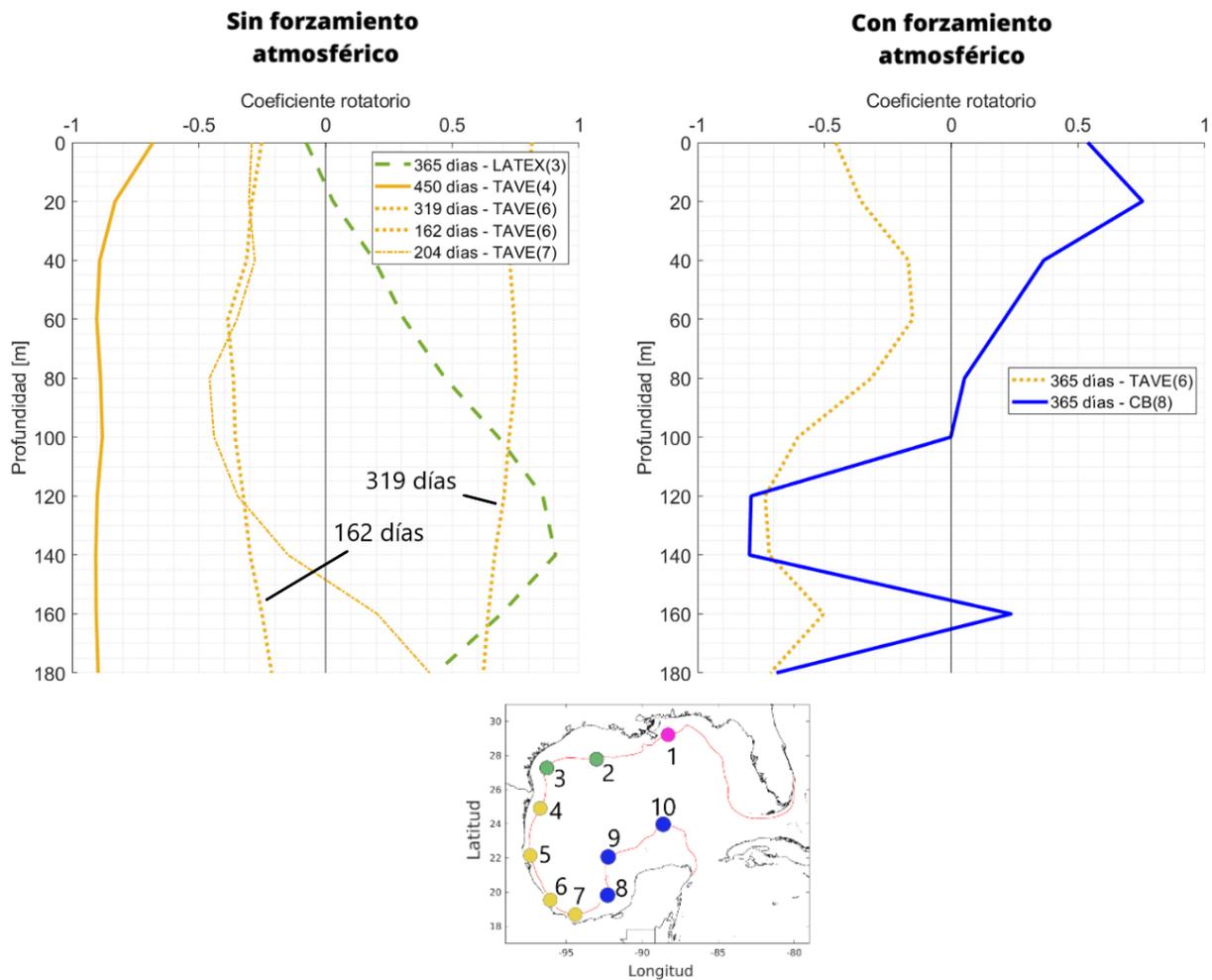


Figura 4.9: Perfiles verticales del coeficiente rotatorio de la velocidad en el sistema alineado con la batimetría para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 200 m en los periodos consistentes en todas las profundidades.

Por otro lado, en el experimento con forzamiento atmosférico se tiene el periodo anual en el punto 6, su comportamiento es más variable, pero con corrientes con rotación horaria para todas las profundidades. El coeficiente rotatorio tiene un menor valor desde la superficie hasta los 80 m, con un valor de -0.3 en promedio y a partir de los 100 m incrementa su valor a -0.6 aproximadamente.

- CB

Finalmente, para esta plataforma, en el experimento con forzamiento atmosférico sólo hay una curva asociada al periodo anual en el punto 8, cercano a la bahía de Campeche. Desde la superficie hasta los 100 m presenta una rotación antihoraria intensa, y a partir de dicha profundidad oscila drásticamente entre valores positivos y negativos de coeficiente rotatorio,

aunque con una tendencia a tener rotación horaria.

### Perfiles verticales de potencia espectral

De igual manera que en la sección dedicada a la plataforma interna, en la Figura 4.10 se presentan los resultados de los perfiles verticales de potencia para ambos experimentos y ambas componentes de la velocidad (*alongshore* y *cross-shore*).

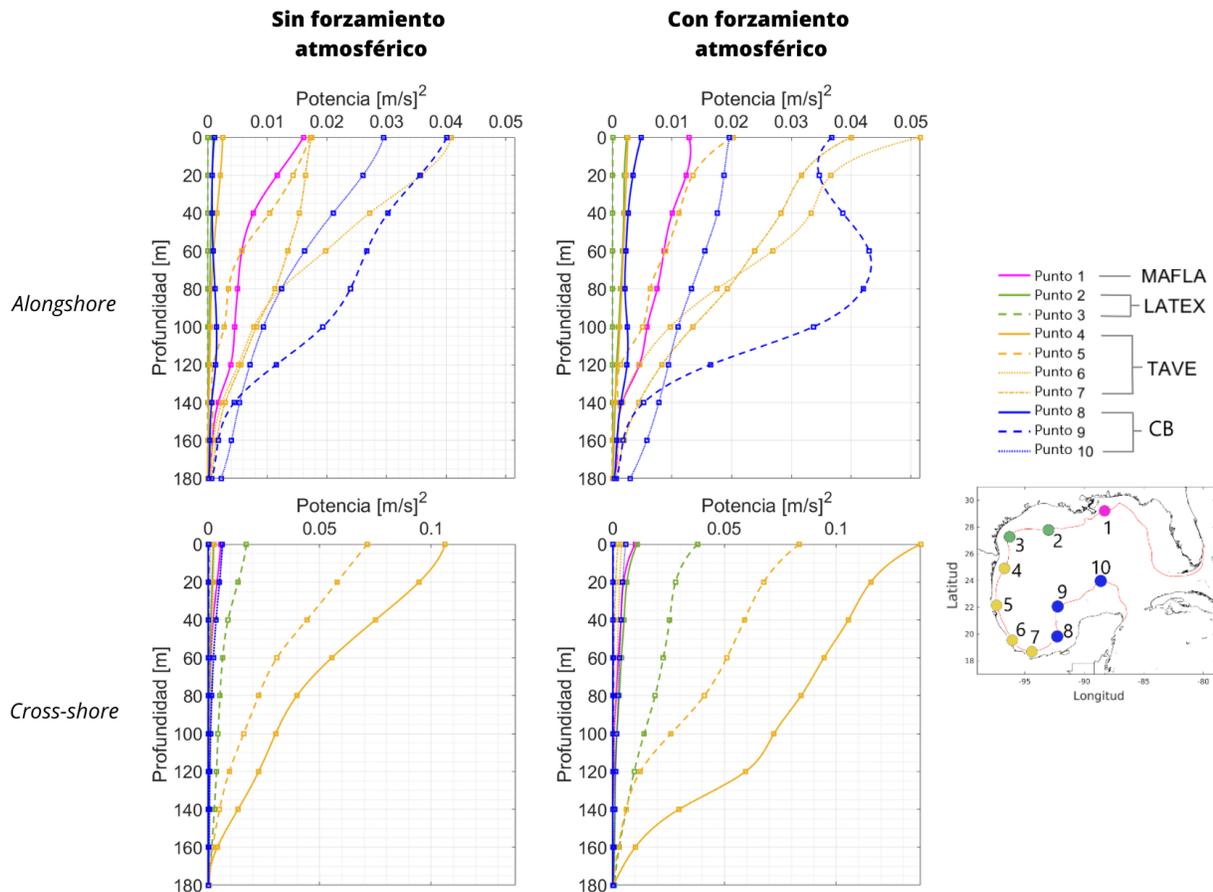


Figura 4.10: Perfiles verticales de potencia espectral de las componentes alongshore y cross-shore de la velocidad para distintos puntos a lo largo de la isóbata de 200 m.

Para el análisis de la plataforma externa ya no se contempla la plataforma WFS, pero se agrega MAFLA, y para TAVE hay cuatro puntos de evaluación, ya que en el análisis de plataforma interna fue uno solamente, cercano a la frontera de México-EE.UU.

De manera general, los perfiles no cambian de manera tan drástica con forzamiento atmosférico como sucedía con los perfiles de la plataforma interna, en otras palabras, la forma de las curvas de cada punto son muy similares en ambos experimentos, indicando menor

influencia del viento en la variabilidad de las corrientes a mayor distancia de la costa. Los puntos situados en la plataforma TAVE no siguen este comportamiento general, ya que la plataforma es muy angosta y el viento es un factor determinante en el comportamiento de las corrientes oceánicas. A continuación se describen los resultados para cada plataforma continental.

- MAFLA

Para el único punto de evaluación en esta plataforma se puede ver que en el experimento con forzamiento atmosférico, en la componente *alongshore* se reduce un poco la potencia en superficie con respecto al experimento sin forzamiento atmosférico, pero esta respuesta sólo se observa a los 0 m, en el resto de las profundidades aumenta mínimamente la potencia, sobre todo entre los 20 y 80 m.

Para la componente *cross-shore* no se aprecia un cambio importante entre los dos experimentos, siendo su valor muy bajo, lo cual indica que la variabilidad de la corriente está concentrada en la componente *alongshore* y no está influenciada por el forzamiento atmosférico, sino por procesos únicamente oceánicos.

- LATEX

En esta plataforma es en la que se tiene menor potencia en la componente *alongshore*, no hay una diferencia apreciable entre ambos experimentos. Sin embargo, respecto a la componente *cross-shore*, es la segunda plataforma con más potencia, únicamente en el punto 3. Con forzamiento atmosférico tiene un incremento del doble de su magnitud que sin forzamiento atmosférico, de  $1,85 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  a  $3,9 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ . Por otro lado, el punto 2 tiene una potencia cercana a cero en ambos experimentos.

- TAVE

Se tienen los valores más altos de potencia para el experimento con forzamiento atmosférico, la potencia para la componente *cross-shore* de velocidad es mayor que la componente *alongshore*, cuyas magnitudes en superficie son 0.13 y 0.05  $\text{(m/s)}^2$  respectivamente. Una característica importante es que para la componente *alongshore*, los puntos 6 y 7 en los estados de Veracruz y Tabasco tienen mayor potencia, y para la componente *cross-shore* los puntos 4 y 5 son los de mayor potencia, ubicados en el estado de Tamaulipas. Por lo que las corrientes en el norte de la plataforma se ven mayormente influenciadas por el esfuerzo del viento perpendicular a la costa, mientras que las corrientes en el sur de la plataforma responden a un esfuerzo del viento paralelo a la costa.

- CB

En la componente *alongshore* de velocidad se puede observar que es la plataforma con mayor potencia de todas y los valores casi no cambian si hay forzamiento atmosférico o no. Para el punto 8, ubicado en la Bahía de Campeche, en ambos experimentos la potencia es muy baja, por lo que no hay un cambio significativo. El punto 9 es el que tiene mayor potencia, tampoco hay mucha diferencia en la magnitud entre ambos experimentos, pero con forzamiento atmosférico entre los 20 y 100 m de profundidad se incrementa anómalamente la potencia, con el máximo absoluto alrededor de los 60 m. La explicación de este fenómeno no se puede definir con facilidad, debido a que se deben analizar con detalle todos los procesos que se llevan a cabo en la zona a profundidad, lo cual resultaría interesante para investiga-

ciones posteriores. En el punto 10, para el experimento sin forzamiento atmosférico se tiene ligeramente mayor potencia que para el experimento con forzamiento atmosférico, con valores de  $0.03 \text{ (m/s)}^2$  y  $0.02 \text{ (m/s)}^2$ , respectivamente.

Para la componente *cross-shore* se observa que esta plataforma es la menos energética en bajas frecuencias para ambos experimentos, por lo que la variabilidad de largo plazo de las corrientes está concentrada principalmente en la componente *alongshore*.

### 4.2.3. Potencia espectral promedio

Por último, se realizó un promedio del valor de la potencia de todos los puntos de evaluación a la misma profundidad para cada componente de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para ambos experimentos, sin forzamiento atmosférico y con forzamiento atmosférico. De esta manera se obtuvieron dos gráficas, una para la isóbata de 50 m y otra para la isóbata de 200 m, mostradas en la Figura 4.11. En cada gráfica hay cuatro barras, correspondientes a la componente *alongshore* de velocidad, con y sin forzamiento atmosférico, y la componente *cross-shore* de velocidad, con y sin forzamiento atmosférico, donde en cada barra los distintos colores representan la potencia acumulada a diferentes profundidades analizadas.

Se observa de manera general que en el experimento con forzamiento atmosférico se tiene mayor potencia en ambas componentes de la velocidad, a excepción de la componente *alongshore* en la isóbata de 50 m, donde se tiene el punto anómalo en el CB que se vio en la Figura 4.8. También, en ambas isóbatas se puede observar que hay mayor potencia en la componente *cross-shore* en ambos experimentos. La potencia total acumulada en la isóbata de 200 m es cinco o seis veces mayor que aquella en la isóbata de 50 m. Se muestra que mientras más somera sea la región, la potencia se concentra preferentemente en los estratos más superficiales y se distribuye de manera más homogénea en toda la columna de agua conforme se incrementa su espesor. Dicho efecto se ve incrementado por el forzamiento atmosférico, pero únicamente en la componente *cross-shore* de la velocidad en la isóbata de 50 m.

En esta misma isóbata la potencia se concentra en la capa superficial, el decaimiento de potencia con la profundidad es abrupto, parecido a un decaimiento exponencial, más de la mitad de la potencia acumulada en toda la columna de agua se concentra en superficie, mientras que alrededor de un 20 % de la potencia se encuentra en los 20 m de profundidad y tan sólo un 10 % en los 40 m. En la isóbata de 200 m el decaimiento de potencia con la profundidad es más suave, con una tendencia más lineal.

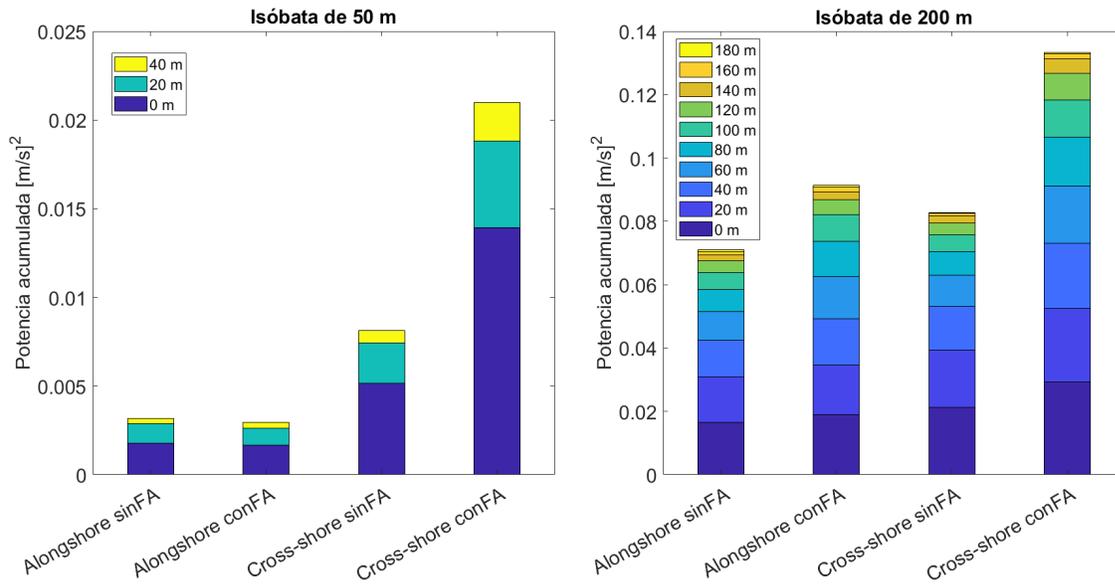


Figura 4.11: Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes de velocidad *alongshore* y *cross-shore* en los puntos de evaluación a lo largo de las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha). Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico.

### 4.3. Variabilidad de las corrientes oceánicas: análisis estacional

Como se mencionó en los métodos de trabajo, también se realizó un análisis estacional de la potencia espectral de las componentes de velocidad: *alongshore* y *cross-shore*, para observar su comportamiento a lo largo del año para los puntos de evaluación establecidos. De este modo, se usaron los meses de enero, abril, julio y octubre como meses representativos de las estaciones del año invierno, primavera, verano y otoño, respectivamente.

Para este análisis se obtuvieron los valores de cada componente de velocidad en cada profundidad para los días de cada mes representativo de todos los años, generando así series de 31 días para los 22 años ( $N=31 \times 22$ ), con 682 valores en profundidad para los meses de enero, julio y octubre, y una serie de 30 días para los 22 años ( $N=30 \times 22$ ) con 660 valores para abril. Después se obtuvieron los perfiles verticales de potencia espectral de cada mes para ambos experimentos, las series resultantes son de menor longitud que aquellas utilizadas para el análisis multianual. La frecuencia fundamental,  $1/N\Delta t$  con  $\Delta t = 1$  día, ahora será mayor y en consecuencia el mayor periodo que se pueda resolver en este análisis es  $N$  días, está será la nueva escala de variabilidad a largo plazo relevante en este análisis.

En el análisis, se observó que en su mayoría para ambos experimentos, julio (verano) y octubre (otoño) son los meses más energéticos en bajas frecuencias, seguidos por enero (invierno) y abril (primavera). Este comportamiento en la energía espectral en bajas frecuencias es diferente al comportamiento climatológico de la intensidad de las corrientes mostrado en la sección 4.1. Además, hay que considerar la ubicación de los puntos de evaluación y que la velocidad en cada profundidad es diferente a la velocidad promediada en la vertical.

### 4.3.1. Plataforma interna

En las Figuras 4.12 y 4.13 se muestran los perfiles de potencia espectral de las componentes de velocidad: *alongshore* y *cross-shore*, respectivamente. De manera general, para ambas componentes de velocidad en todas las plataformas en el experimento sin forzamiento atmosférico se puede observar una potencia más baja que aquellas magnitudes en el experimento con forzamiento atmosférico.

La potencia de la componente *alongshore* de la velocidad para el experimento sin forzamiento atmosférico es casi nula en casi todas las plataformas durante todo el año, excepto en el CB, donde se tienen valores bajos todo el año. El forzamiento atmosférico incrementa de manera importante la potencia en el este de LATEX y en el CB durante el verano y otoño en toda la columna de agua, mientras que en invierno y primavera el incremento en potencia es menor. Para las otras regiones el forzamiento atmosférico tiene un efecto marginal.

Con respecto a la componente *cross-shore* de la velocidad, sólo el norte de TAVE tiene una potencia significativa, la cual se mantiene durante todo el año, con descensos en invierno y verano. En las plataformas WFS y LATEX se tiene una potencia baja que se mantiene durante todo el año, mientras que en el CB la potencia es casi nula durante todo el año. Con forzamiento atmosférico, la potencia en toda la columna de agua al oeste de LATEX y norte de TAVE se incrementa de manera importante en el verano, la cual va disminuyendo en otoño e invierno hasta llegar a un mínimo en primavera. En WFS, el forzamiento atmosférico incrementa un poco la potencia durante todo el año con incrementos un tanto mayores durante la primavera y el verano. Para la plataforma CB, el forzamiento atmosférico tiene un efecto marginal en la potencia durante todo el año.

Para la componente *alongshore* de velocidad sólo se describirán las plataformas LATEX y CB, las demás tienen una potencia muy baja. Para la componente de velocidad *cross-shore* se describirán las plataformas LATEX y TAVE por las mismas razones.

- LATEX

Para la componente *alongshore* de velocidad, el punto 3 es el único punto en la plataforma que tiene una potencia distinta a cero, y sólo para el experimento con forzamiento atmosférico, por lo que a continuación se referirá a este punto en específico. En el experimento sin forzamiento atmosférico la potencia es muy baja en todas las estaciones, por lo que no se describirá a detalle.

En invierno, en dicho punto, la potencia es similar en la superficie y a los 20 m, con una

magnitud de  $2,1 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  y  $2 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ , respectivamente. A los 40 m la potencia disminuye a  $1 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ . En primavera la potencia aumenta con respecto a la estación anterior y el decaimiento es un poco más rápido, en superficie se tiene una potencia de  $5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  y reduce con la profundidad hasta ser cero a los 40 m. En verano se observa que la potencia aumenta aún más, en la superficie la potencia es de  $7 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ , a los 20 m alcanza el valor máximo de  $11 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  y a los 40 m se reduce a  $2,5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ . En otoño el decaimiento sigue una tendencia más lineal, con mayor potencia en superficie ( $5,1 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ ) y reduciéndose hasta  $1 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  a los 40 m.

Para la componente *cross-shore* de velocidad, en el experimento con forzamiento atmosférico, el punto 4 es el único punto en la plataforma con una potencia importante en las cuatro estaciones, por lo que a continuación se referirá a este punto en específico. En invierno la potencia es de  $16 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  en superficie y con la profundidad la potencia decae hasta  $4 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  a los 40 m. En primavera el perfil de la potencia es similar al invierno. En verano incrementa drásticamente la potencia hasta  $0,05 \text{ (m/s)}^2$  en superficie con un decaimiento rápido, ya que a los 20 m se reduce hasta  $0,018 \text{ (m/s)}^2$  y a los 40 m alcanza el mínimo de  $9 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ . En el otoño el perfil vuelve a ser parecido al de la primavera, pero con magnitudes ligeramente mayores.

- TAVE

Para la componente *cross-shore*, en el único punto de evaluación, se puede apreciar que en ambos experimentos el perfil de la potencia es similar dado el escarpe tan abrupto en la plataforma, como se ha discutido en otras secciones. Asimismo, el decaimiento es similar a lo largo del año y entre los dos experimentos, sólo se modifican las magnitudes. En invierno es la plataforma con más energía espectral, en el experimento sin forzamiento atmosférico se tiene  $0,013 \text{ (m/s)}^2$  en superficie, mientras que en el experimento con forzamiento atmosférico se tiene una potencia máxima de  $0,023 \text{ (m/s)}^2$  en superficie. En primavera, en el experimento sin forzamiento atmosférico se tiene mayor potencia, la potencia incrementa a  $0,016 \text{ (m/s)}^2$  en superficie y con forzamiento atmosférico decremента a  $0,01 \text{ (m/s)}^2$  en superficie. En verano, en el experimento sin forzamiento atmosférico se reduce la potencia en superficie a  $0,01 \text{ (m/s)}^2$  y con forzamiento atmosférico incrementa la potencia hasta  $0,032 \text{ (m/s)}^2$  en superficie. A partir de esta estación, la potencia a los 20 m también incrementa a  $0,012 \text{ (m/s)}^2$ . En otoño, en el experimento sin forzamiento atmosférico vuelve a incrementar la potencia, alcanzando  $0,016 \text{ (m/s)}^2$  en superficie, mientras que con forzamiento atmosférico, el perfil es similar al del verano, las magnitudes también son similares, sólo a los 20 m incrementa ligeramente a  $0,014 \text{ (m/s)}^2$ .

- CB

Para la componente *alongshore* de velocidad, en el experimento sin forzamiento atmosférico, los perfiles de cada estación son muy similares entre sí, el decaimiento es prácticamente el mismo para los tres puntos de evaluación en esta plataforma, sólo las magnitudes son diferentes, pero tampoco varían tanto. En general, en el punto 6 se tiene casi la misma potencia en superficie y a los 20 m, con un valor promedio de  $1,5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  en las cuatro estaciones, a los 40 m se reduce hasta ser cero. En el punto 7 y 8 se tiene un decaimiento lineal que a los 40 m se vuelve cero, sin embargo, hay mayor potencia en el punto 8, ya que en superficie

su potencia media en las estaciones es de  $3,2 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ , mientras que en el punto 7 es de  $1 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ . También, para esta componente de velocidad, los perfiles en el experimento sin forzamiento atmosférico siempre tienen menor energía espectral que el experimento con forzamiento atmosférico.

Para el experimento con forzamiento atmosférico, el punto 6 es en general el de mayor energía espectral en todos los meses, excepto primavera, y en segundo lugar es el punto 7 durante el invierno y la primavera, y el punto 8 durante el verano y el otoño.

En el invierno, el decaimiento de potencia es similar entre los tres puntos de evaluación, tienen magnitudes diferentes pero muy similares en superficie, en profundidad se juntan las curvas hasta coincidir todas a los 40 m a  $0,8 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ . En la primavera las curvas de los puntos 6 y 7 son parecidas entre ellas, tienen un decaimiento lento que se reduce con la profundidad, el punto 7 tiene un decaimiento lineal y es el punto con más potencia espectral de la temporada. En verano, la potencia en el punto 6 incrementa hasta  $15 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  en superficie, con un decaimiento rápido, reduciéndose su magnitud hasta  $2 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  a los 40 m. El punto 7 es el menos energético espectralmente y su potencia se reduce con más lentitud entre los 20 y 40 m, en el punto 8 la potencia decae más rápido que en el punto 7. Durante el otoño se observa un decaimiento más lineal en los puntos 6 y 8, éste primero es el de mayor potencia en todas las profundidades y sus magnitudes son similares a las del verano, con una potencia máxima de  $16 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  en superficie, en el punto 7 se tiene casi la misma potencia en superficie y a los 40 m ( $2,1 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ ) e incrementa ligeramente a los 20 m a  $2,5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ , también a los 40 m la potencia es mayor que en el punto 8 a la misma profundidad.

### 4.3.2. Plataforma externa

Para la plataforma externa, en la Figura 4.14 se muestran los perfiles verticales de potencia espectral para la componente *alongshore* de velocidad y en la Figura 4.15 para la componente *cross-shore* de velocidad. En comparación con el caso de la plataforma interna, aquí los perfiles en el experimento sin forzamiento atmosférico tienen mayor potencia, principalmente en la componente *cross-shore*, para ésta, en ambos experimentos se tiene un comportamiento similar en superficie pero con diferencias a profundidad. A grandes rasgos, se puede observar que el viento ya no es el forzamiento principal en la plataforma externa.

Para la componente *alongshore* de la velocidad, la parte sur de TAVE y el norte de CB son las regiones con mayor potencia en el experimento sin forzamiento atmosférico, principalmente durante invierno, con otoño como la estación con la menor potencia entre todas las plataformas. Para las otras regiones, el forzamiento atmosférico tiene un efecto marginal en la potencia, la cual se mantiene en valores similares a lo largo del año.

Con respecto a la componente *cross-shore* de la velocidad, para el experimento sin forzamiento atmosférico la potencia es muy baja para casi todas las plataformas a lo largo del año, excepto en el norte de TAVE, donde la potencia es alta durante casi todo el año, con un

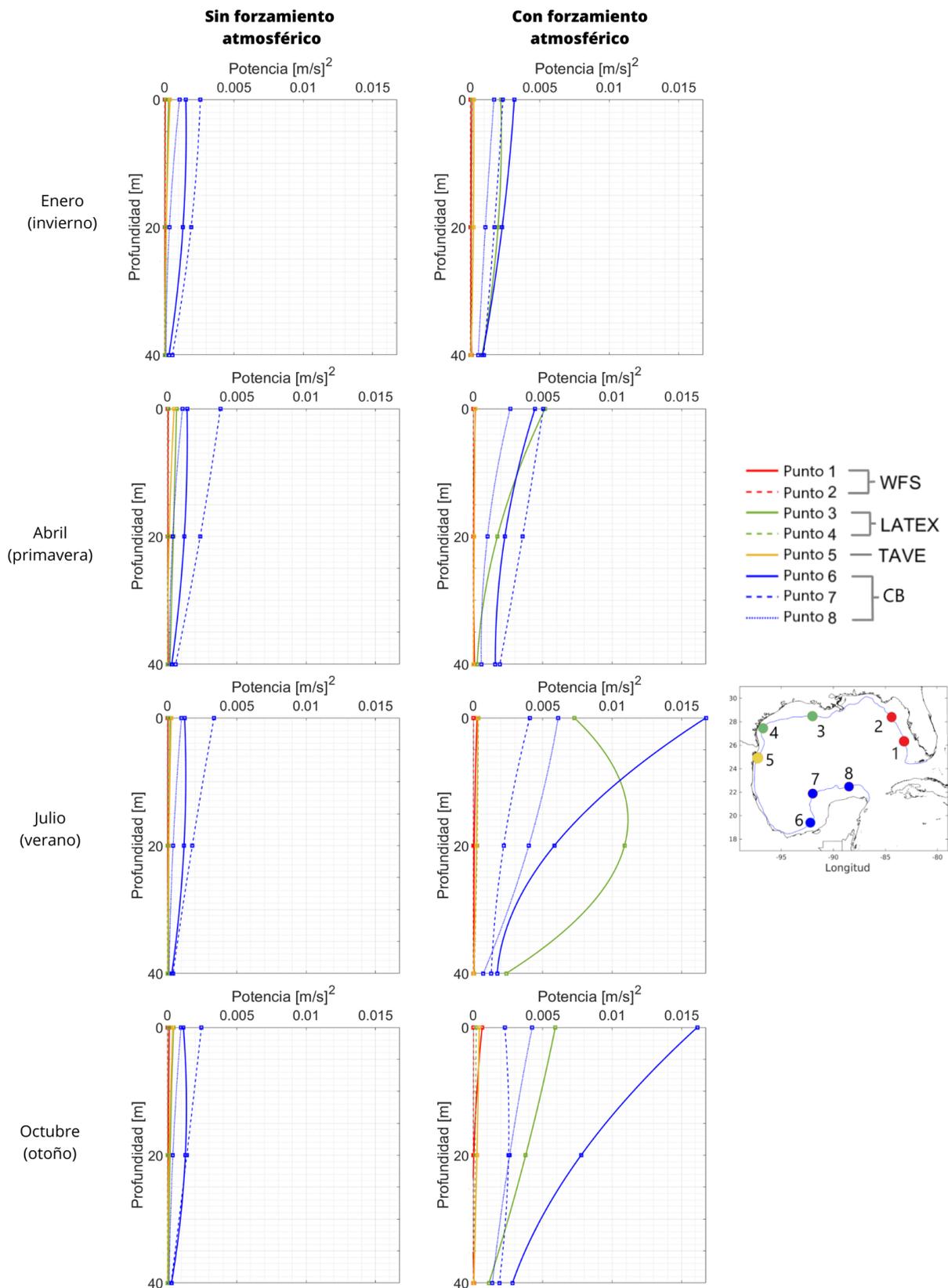


Figura 4.12: Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad *alongshore* para distintos puntos en la isóbata de los 50 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre.

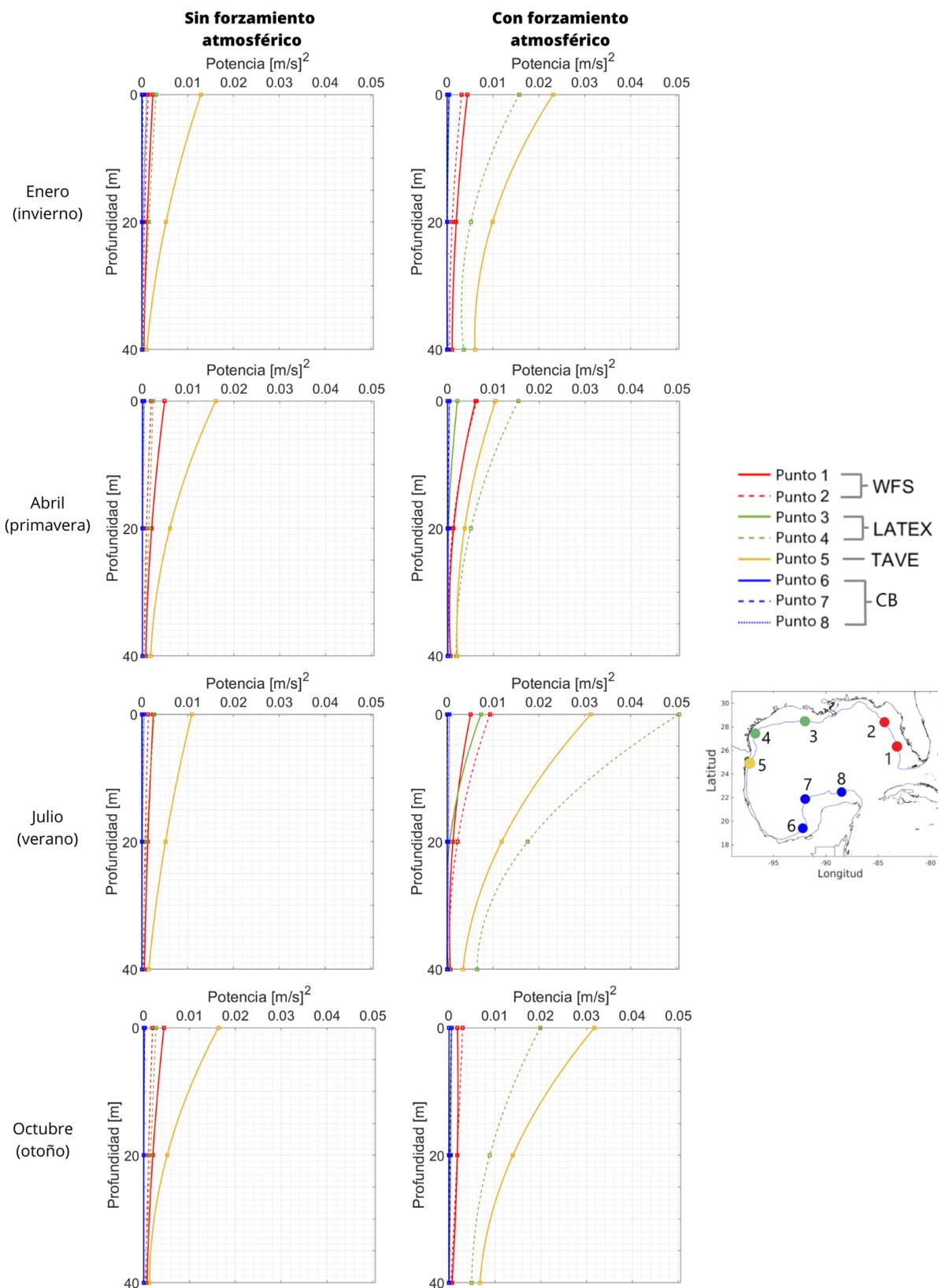


Figura 4.13: Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad *cross-shore* para distintos puntos en la isóbata de los 50 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre.

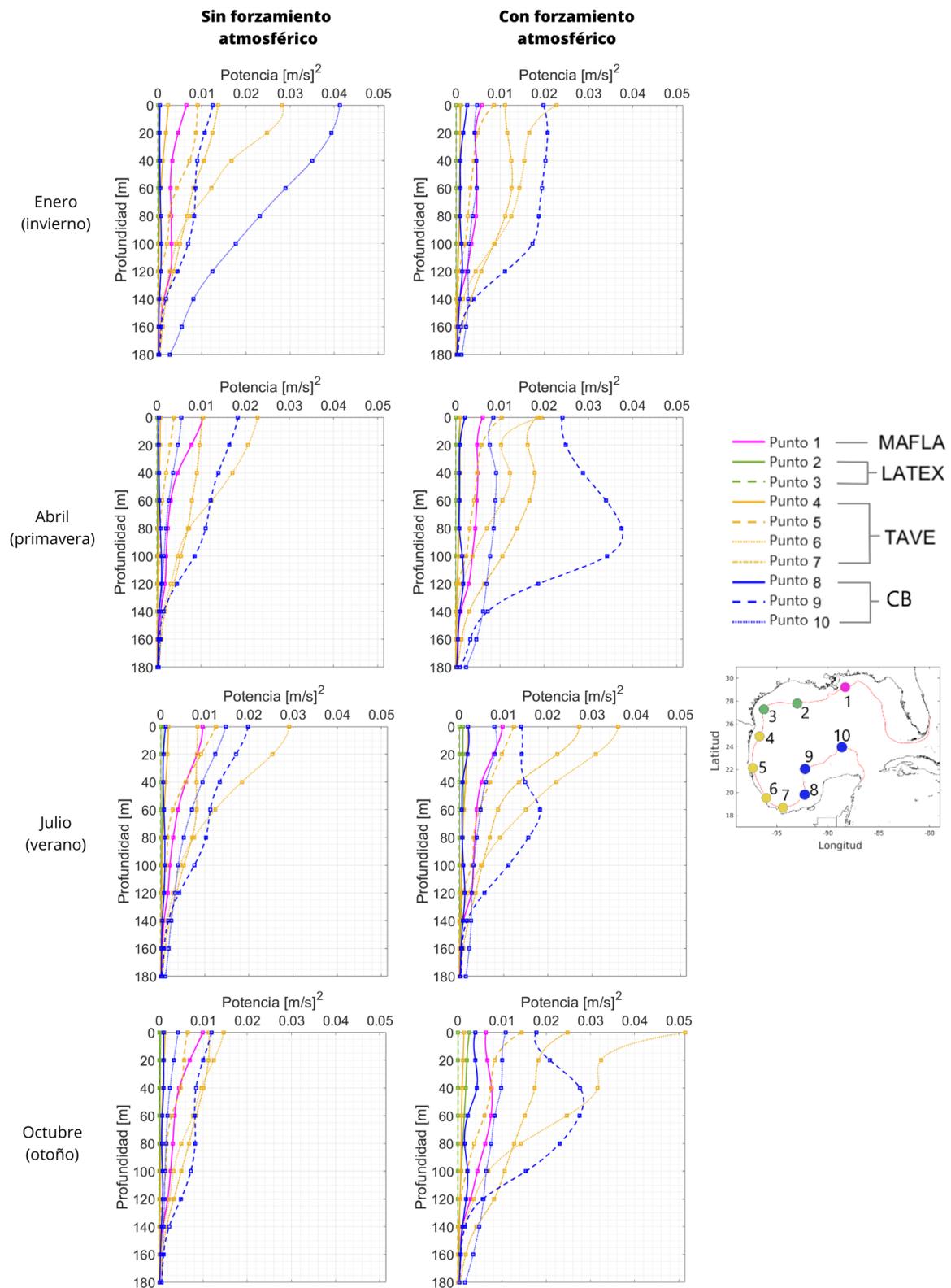


Figura 4.14: Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad *alongshore* para distintos puntos en la isóbata de los 200 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre.

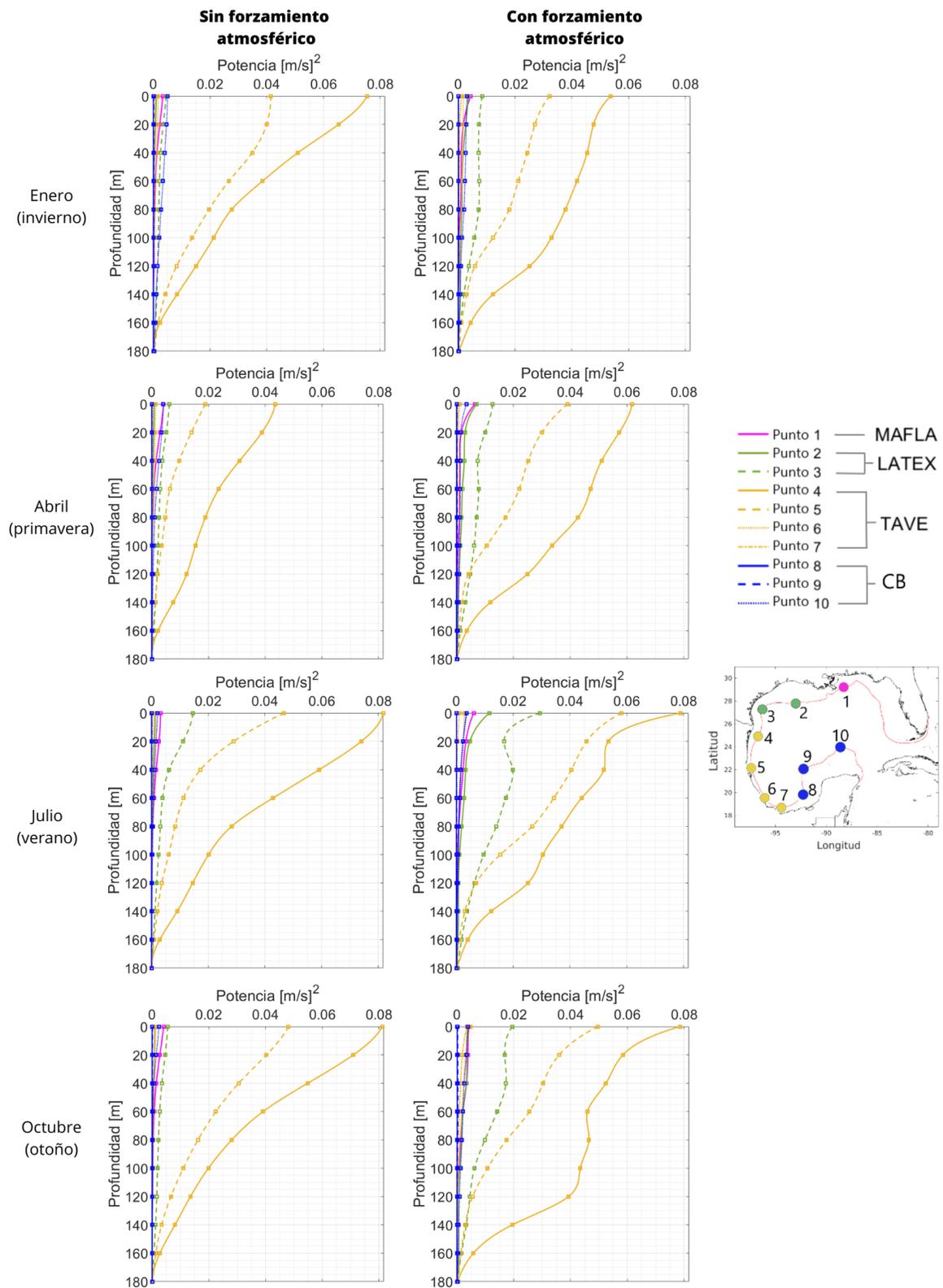


Figura 4.15: Perfiles verticales de potencia de la componente de velocidad *cross-shore* para distintos puntos en la isóbata de los 200 m, correspondientes a los meses de enero, abril, julio y octubre.

ligero descenso en primavera. El forzamiento atmosférico incrementa la potencia a lo largo de la columna de agua en el norte de TAVE durante todo el año. Asimismo, incrementa la potencia moderadamente en el oeste de LATEX, principalmente durante verano y otoño. Para las otras regiones, el forzamiento atmosférico tiene un efecto marginal en la potencia, la cual se mantiene con valores similares a lo largo del año.

A continuación se describirán los perfiles observados con mayor detalle para todas las plataformas.

- MAFLA

Para la componente *alongshore* los perfiles de ambos experimentos en cada estación son similares, la estación con más energía espectral es el verano, con un máximo de  $10 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  y en las otras estaciones la potencia es casi la misma, en superficie tienen  $6 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ , la cual se mantiene hasta los 100 m y a mayor profundidad se reduce a cero.

- LATEX

En esta plataforma, para la componente *cross-shore* en el experimento sin forzamiento atmosférico, la potencia es muy baja, únicamente en el verano la potencia incrementa a  $1,4 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y su decaimiento es rápido, a partir de los 60 m empieza a reducirse hasta cero. En el experimento con forzamiento atmosférico, el punto 3 tiene mayor potencia que el punto 2, ya que en el punto 2 la potencia siempre es cercana a cero y solamente en el verano en superficie incrementa a  $1,2 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y a profundidad es cero. En el punto 3, durante la primavera y el verano los perfiles son muy parecidos, la potencia en superficie es en promedio  $1 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y se mantienen hasta los 120 m, a mayor profundidad se reduce hasta cero. En el verano, la potencia incrementa a  $3 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  en superficie, se reduce a los 20 m y aumenta nuevamente a  $2 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  a los 40 m, después se reduce su magnitud de manera lineal hasta cero a los 180 m. En el otoño la potencia se conserva entre los 0 y 40 m, y conforme incrementa la profundidad la potencia se reduce.

- TAVE

En TAVE se observa que para la componente *alongshore*, en el experimento sin forzamiento atmosférico, el invierno y el verano son las estaciones con mayor potencia, con un máximo de  $2,9 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  en superficie y durante el otoño se tiene menor potencia. Por otro lado, en el experimento con forzamiento atmosférico, en otoño se tiene mayor potencia, con un máximo de  $5 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  en superficie y la primavera tiene menor potencia. Los puntos de evaluación 6 y 7 son los que tienen mayor energía espectral en bajas frecuencias.

En el invierno, en el experimento sin forzamiento atmosférico se tiene mayor potencia que en el experimento con forzamiento atmosférico e incluso se reduce con mayor lentitud en el punto 6, la potencia es de  $2,9 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y  $2,3 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ , respectivamente. En la primavera, el experimento sin forzamiento atmosférico también tiene mayor potencia, aunque se reduce de manera más rápida en el punto 6. En el experimento con forzamiento atmosférico los perfiles de los puntos 6 y 7 son parecidos y tienen mayor potencia en la superficie y a los 40 m. En el verano se incrementa la potencia en ambos experimentos, sin embargo, a partir de esta estación, los perfiles con forzamiento atmosférico tienen más potencia. En el experimento con forzamiento atmosférico, los perfiles de los puntos 6 y 7 también son parecidos, su potencia en superficie es de  $3,6 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y  $2,7 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ ,

respectivamente, y decrementa rápidamente con la profundidad. Finalmente, para el otoño, se incrementa la potencia en el punto 6, con un máximo de  $5 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ .

Analizando ahora la componente *cross-shore* de velocidad, se observa que los puntos 4 y 5 son los que tienen mayor energía espectral en bajas frecuencias a lo largo de las cuatro estaciones. Para esta componente de velocidad, en ambos experimentos ya no hay una diferencia notoria en los perfiles, son bastante similares con algunas diferencias a mayor profundidad. Asimismo, las variaciones de potencia no son diferentes en cada estación, se alcanzan casi las mismas magnitudes, no obstante, el verano y el otoño son las estaciones con mayor potencia.

En el invierno, en el experimento con forzamiento atmosférico se tiene mayor potencia en superficie que sin forzamiento atmosférico, sin embargo, este último a profundidad tiene mayor potencia en el punto 4 y la potencia decrementa más lento. En la primavera, en el experimento con forzamiento atmosférico se tiene mayor potencia y de igual manera mayor potencia a profundidad con un decremento más lento que el perfil sin forzamiento atmosférico para los puntos 4 y 5. En el verano, de igual manera que en el invierno, en el experimento sin forzamiento atmosférico los perfiles de los puntos 4 y 5 tienen mayor potencia en superficie,  $8 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y  $4,6 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ , respectivamente, y la potencia a profundidad se reduce rápidamente. Por otro lado, en los perfiles con forzamiento atmosférico se observa ligeramente menor potencia en superficie que en el otro experimento, pero a profundidad decae más lento y tarda más en reducirse a cero. Finalmente, en el otoño, en el experimento sin forzamiento atmosférico los perfiles son prácticamente iguales que en el verano, y con forzamiento atmosférico, en el perfil del punto 4 se observa que la potencia se conserva entre los 60 m y 120 m alrededor de  $4 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y a mayor profundidad se reduce rápidamente a cero hasta los 180 m. En el perfil del punto 5 no se observa un cambio significativo con respecto al perfil sin forzamiento atmosférico.

- CB

Para la componente *alongshore* de velocidad, el punto 9 es el de mayor energía espectral en ambos experimentos para todas las estaciones, excepto para el perfil del invierno sin forzamiento atmosférico, donde el punto 10 es el más energético en bajas frecuencias.

En el invierno, en el experimento sin forzamiento atmosférico se tiene mayor potencia en los puntos 9 y 10 que con forzamiento atmosférico, en superficie tienen  $1,2 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y  $4,1 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ , respectivamente. Para el punto 9, la potencia se conserva desde la superficie hasta los 100 m y a mayor profundidad se reduce a cero, para el punto 10 la potencia decae casi linealmente. Por otro lado, en el perfil con forzamiento atmosférico, se observa que para el punto 9 la potencia en superficie es de  $2 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ , la cual se conserva hasta los 100 m y se reduce hasta cero a mayor profundidad, igual que en el experimento sin forzamiento atmosférico. Para el punto 10, la potencia oscila entre  $0,4 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$  en toda la columna de agua.

En la primavera, en el experimento sin forzamiento atmosférico, los perfiles de los puntos 9 y 10 son similares entre sí, la potencia se reduce desde la superficie hasta los 140 m y más profundo se vuelve cero, mientras que en el experimento con forzamiento atmosférico, en el punto 9 la potencia en superficie es de  $2,4 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y aumenta con la profundidad hasta

alcanzar un máximo de  $3,75 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y a mayor profundidad decrece rápidamente, en el perfil del punto 10 la potencia en superficie es  $0,91 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ , la cual se conserva en casi toda la columna de agua. En el verano, en el experimento sin forzamiento atmosférico ambos perfiles de los puntos 9 y 10 tienen casi el mismo decaimiento de potencia y a partir de los 140 m la potencia es casi cero. Por otro lado, en los perfiles con forzamiento atmosférico, en el punto 9 la potencia se conserva entre la superficie y los 40 m, con una magnitud de  $1,3 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$ , a los 60 m incrementa hasta un máximo de  $1,8 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  y a mayor profundidad se reduce hasta ser cero. En el punto 10 la potencia casi se mantiene en  $0,2 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  en toda la columna de agua. Finalmente, en el otoño, en el experimento sin forzamiento atmosférico los perfiles son similares al verano pero con menor potencia. En el experimento con forzamiento atmosférico, los perfiles también son similares al del verano pero con mayor potencia, en el punto 9, por ejemplo, el máximo es de  $2,8 \times 10^{-2} \text{ (m/s)}^2$  a los 40 y 60 m.

### 4.3.3. Potencia espectral promedio

De igual manera que en el capítulo anterior, se realizó un promedio de la potencia considerando todos los puntos de evaluación a la misma profundidad, obteniendo gráficas de barras con la potencia promedio para cada estación. De esta manera podemos visualizar la potencia media en diferentes profundidades para las cuatro estaciones. En las Figuras 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran dichas gráficas de decaimiento de potencia con la profundidad en invierno, primavera, verano y otoño, respectivamente. A grandes rasgos, la componente *cross-shore* de velocidad siempre tiene más potencia que la componente *alongshore* de velocidad en ambos experimentos y en ambas isóbatas, principalmente en la isóbata de 50 m. En la isóbata de 200 m, el esfuerzo del viento no es el principal factor de forzamiento, mostrando menor relación entre la magnitud de la potencia y el forzamiento atmosférico.

De manera específica, en invierno, en la isóbata de 50 m, la componente *cross-shore* con forzamiento atmosférico es la que tiene mayor potencia promedio ( $9,8 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ ) que las demás, alrededor de tres veces más potencia que la componente *alongshore* para el mismo experimento ( $3 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ ). En la isóbata de 200 m se observa que en esta estación, para ambas componentes de velocidad, la potencia en el experimento sin forzamiento atmosférico es mayor que en el experimento con forzamiento atmosférico.

En primavera, se observa que en la isóbata de 50 m incrementa la potencia para las componentes *alongshore* con forzamiento atmosférico ( $4 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ ) y la *cross-shore* sin forzamiento atmosférico ( $5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}^2$ ). En la isóbata de 200 m la potencia en el experimento sin forzamiento atmosférico se reduce con respecto al invierno, por lo que la potencia en el experimento con forzamiento atmosférico es mayor.

En verano, en la isóbata de 50 m, la potencia en la componente *alongshore* con forzamiento atmosférico y la componente *cross-shore* sin forzamiento atmosférico incrementan alrededor del doble su potencia. En la isóbata de 200 m, la potencia para todas las componentes incrementa, especialmente la componente *cross-shore* en ambos experimentos, que es mayor

que la potencia acumulada de la componente *alongshore*.

Finalmente, en otoño, en la isóbata de 50 m se vuelve a reducir la potencia en ambas componentes para ambos experimentos. En la isóbata de 200 m, la potencia en la componente *alongshore* sin forzamiento atmosférico se reduce  $0.01 \text{ (m/s)}^2$  y con forzamiento atmosférico incrementa  $0.02 \text{ (m/s)}^2$ , en el caso de la componente *cross-shore* prácticamente se conserva la potencia de la estación anterior en ambos experimentos.

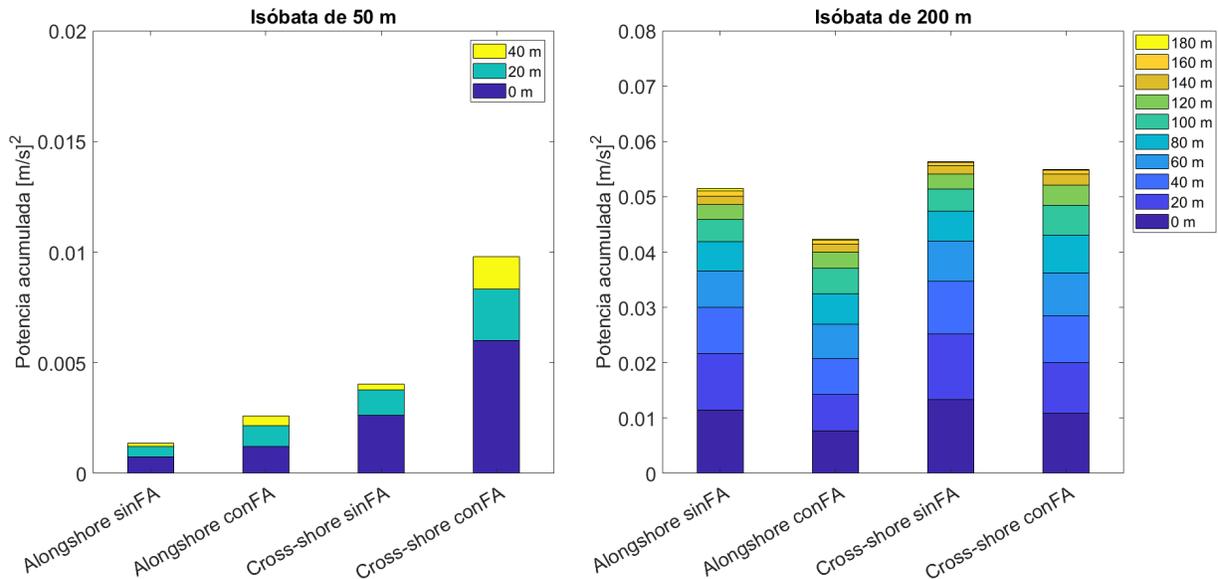


Figura 4.16: Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes *alongshore* y *cross-shore* de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en invierno. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico.

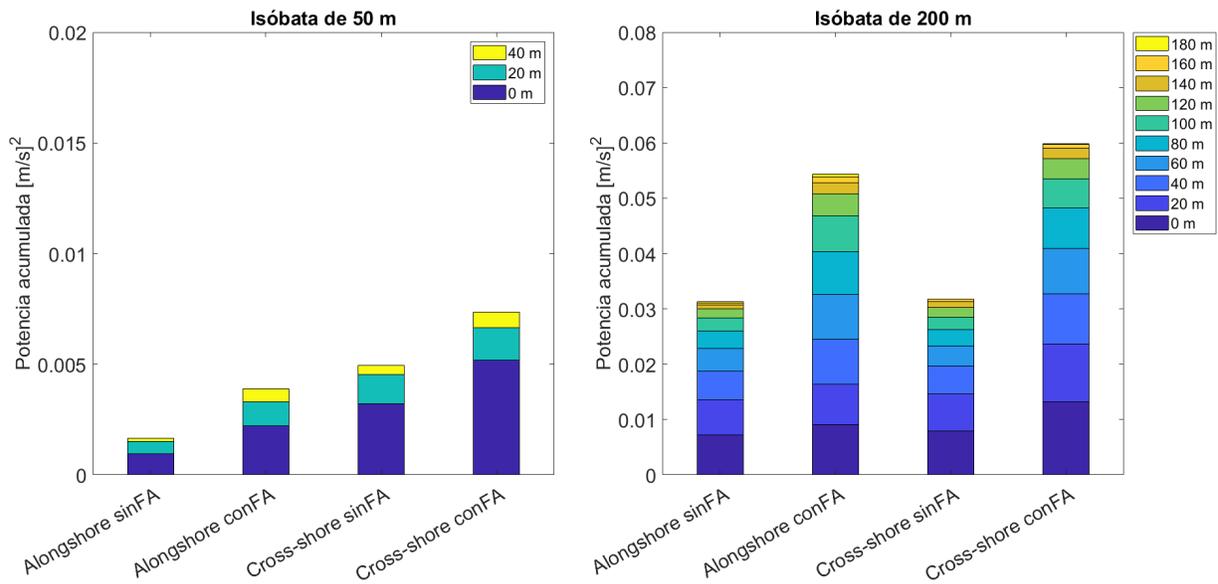


Figura 4.17: Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes *alongshore* y *cross-shore* de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en primavera. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico.

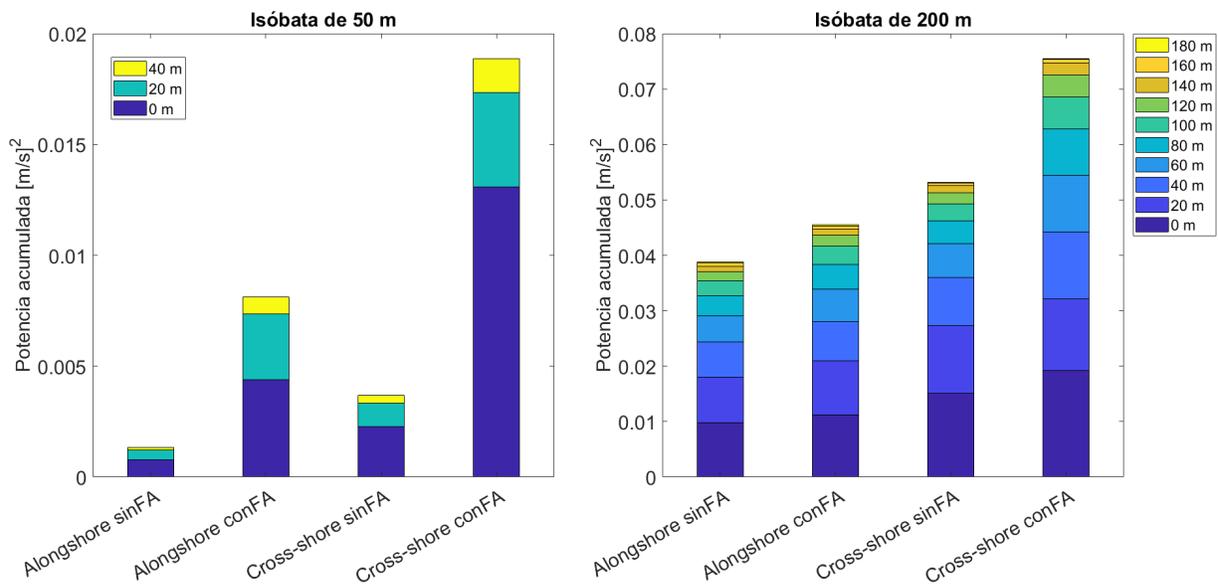


Figura 4.18: Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes *alongshore* y *cross-shore* de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en verano. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico.

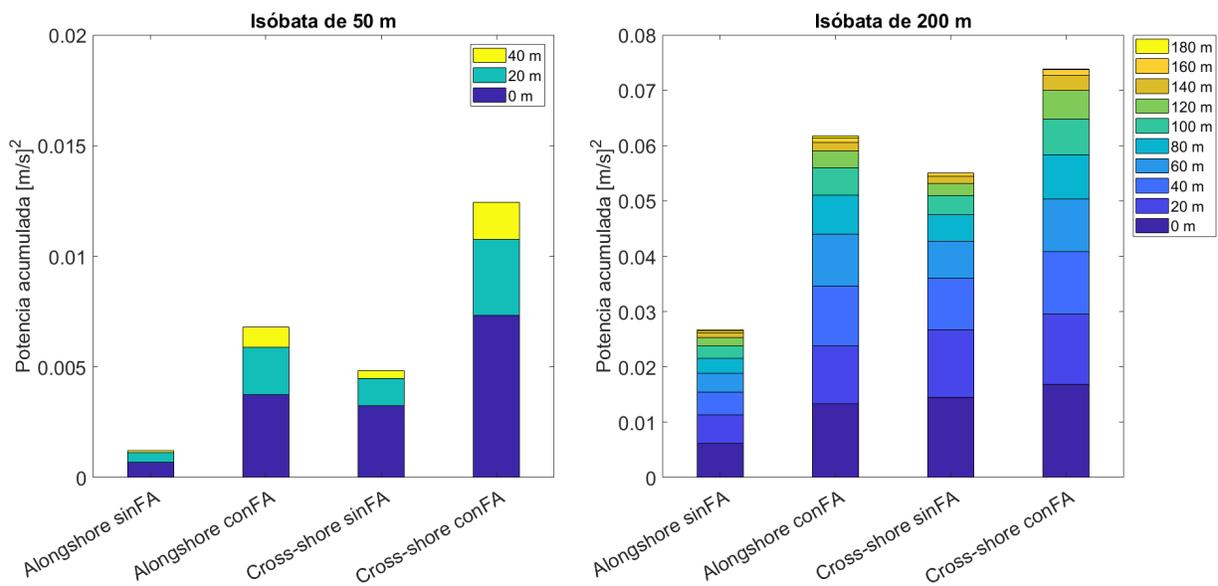


Figura 4.19: Gráficas de la potencia espectral promedio de las componentes *alongshore* y *cross-shore* de la velocidad en las isóbatas de 50 m (izquierda) y 200 m (derecha) en otoño. Las siglas sinFA corresponden al experimento sin forzamiento atmosférico y conFA al experimento con forzamiento atmosférico.

# Capítulo 5

## Discusión y conclusiones

En este trabajo se analizó la influencia del forzamiento atmosférico en la variabilidad de largo plazo de las corrientes oceánicas en las plataformas continentales del GdM a través del uso de dos experimentos, uno sin forzamiento atmosférico y otro con él, implementados con el modelo de circulación general HYCOM. Se obtuvieron los perfiles verticales de potencia espectral y del coeficiente rotatorio para todo el periodo de análisis (22 años), así como para las cuatro estaciones del año. Para poder complementar dichos análisis, se obtuvieron las climatologías mensuales del esfuerzo del viento y de las corrientes oceánicas en las plataformas continentales.

Para el experimento sin forzamiento atmosférico, las corrientes son menos intensas que para el experimento con forzamiento atmosférico, con magnitud y dirección que se mantienen con pocos cambios durante todo el año. Para éste último se comprobó un aumento de la velocidad, con una importante variación estacional. Las corrientes costeras siguen una trayectoria muy definida: con sentido mayoritariamente paralelo a la costa para el caso del CB, WFS y MAFLA, y con un sentido mayoritariamente perpendicular para TAVE y LATEX. Estos resultados son consistentes en su mayoría con la literatura reportada, en donde se ha descrito con detalle la variabilidad estacional de las corrientes en las plataformas. No obstante, hay ligeras diferencias, ya que en esta tesis no se logró observar el cambio de dirección de la corriente en WFS. Para el caso de LATEX sí se observó la inversión de la corriente en verano y para TAVE sólo se da la inversión en la zona sur de la plataforma.

El forzamiento atmosférico provoca que la energía espectral se concentre en los períodos anual y semianual, que dicha energía tenga un decremento moderado con la profundidad y que el coeficiente rotatorio sea consistente en toda la columna de agua. Cuando no hay forzamiento atmosférico se tiene un mayor número de periodos significativos donde se concentra la energía

espectral y ésta en profundidad se reduce de manera más drástica.

Con respecto al sentido de giro de las corrientes, se obtuvo lo siguiente. En la plataforma interna, sin forzamiento atmosférico, en todas las plataformas se tiene un sentido de giro antihorario. Con forzamiento atmosférico, en LATEX prácticamente se tiene un movimiento rectilíneo y en TAVE se tiene una rotación antihoraria, mientras que en WFS y en CB se tiene una rotación fuertemente horaria. Es importante destacar que en el sur de la Bahía de Campeche se tienen dos periodos para el punto 6 (181 y 365 días) que son consistentes en todas las profundidades, lo cual indicaría que el comportamiento de la columna es de naturaleza barotrópica.

En la plataforma externa el sentido de giro de las corrientes es más variable en ambos experimentos, lo cual sugiere una mayor presencia de forzamientos involucrados en la variabilidad. Con forzamiento atmosférico, se tiene que en CB el sentido de rotación es horario, excepto en el punto 7 en el Escarpe de Campeche. Asimismo, el sur de la Bahía de Campeche es la única región con coeficientes rotatorios consistentes en todas las profundidades (puntos 6 y 8), lo cual también sucedió en la plataforma interna, sugiriendo una naturaleza barotrópica de la circulación en dicha región.

También se identificó una relación entre el esfuerzo del viento y la potencia espectral, si en un punto determinado el esfuerzo es mayor entonces repercute en una mayor potencia y en mayor cantidad de periodos significativos consistentes en toda la columna de agua. El forzamiento atmosférico tiene mayor influencia cerca de la costa y menor influencia conforme se aleja de la costa.

En cuanto a la potencia espectral, en la plataforma interna se observó que en CB se tiene mayor potencia sin forzamiento atmosférico en el norte de la plataforma (punto 8) y que al oeste de la plataforma (puntos 6 y 7) no hay diferencia entre ambos experimentos. Esto sugiere que el forzamiento atmosférico no es el principal forzamiento asociado a la variabilidad de la circulación en la plataforma, la cual está fuertemente influenciada por la CL debido a su cercanía (Vázquez De La Cerda et al., 2005; Zavala-Hidalgo et al., 2003, 2014).

Asimismo, se observó que la potencia espectral está fuertemente relacionada con la dirección e intensidad del esfuerzo del viento. En la plataforma interna de LATEX se tuvieron los valores más altos de potencia en la componente *cross-shore* de velocidad, que coinciden con valores altos del esfuerzo del viento, mientras que en la plataforma externa se tienen comportamientos diferentes al norte y sur de la plataforma: al norte hay mayor potencia en la componente *cross-shore*, pero al sur se tiene mayor potencia en la componente *alongshore*. En LATEX pasa algo similar, al oeste de la plataforma interna la potencia se concentra en la componente *cross-shore* y al este en la componente *alongshore* de velocidad, sin embargo, en la plataforma externa la potencia se concentra casi exclusivamente en la componente *cross-shore*. En CB se obtuvieron los valores más altos de potencia en la componente *alongshore*, tanto en la plataforma interna como en la externa.

Respecto al análisis estacional, para la plataforma interna el verano es la estación con mayor energía espectral y para la plataforma externa lo es el otoño principalmente. En la plataforma interna la mayor cantidad de la energía espectral se concentra en superficie y reduce drásticamente con las profundidades, mientras que en la plataforma externa la reducción

de la energía espectral con la profundidad es más lineal y el forzamiento atmosférico influye menos.

El análisis realizado se llevó a cabo considerando puntos específicos de evaluación en el GdM, por lo que no es posible realizar una descripción completa del comportamiento en cada plataforma. Este trabajo no pretende describir detalladamente la circulación oceánica en las plataformas continentales, si no enfocarse en su variabilidad, es decir, en la forma del espectro, el número de frecuencias significativas y el contenido de energía espectral. Si en una ubicación específica se tiene más potencia espectral, esto significa que hay más factores involucrados en la variabilidad de la circulación, las cuales pueden ser efectos del viento, descarga de ríos, turbulencia y/o remolinos en profundidad, por mencionar algunos. La descripción de la variabilidad de las corrientes oceánicas a lo largo y a través de las isóbatas en distintas ubicaciones en el GdM, en conjunto con su sentido de giro y los periodos en los que estos ocurren, podrían ser de utilidad para analizar los procesos de transporte de agua e intercambio de trazadores entre las aguas someras y profundas a lo largo de la columna de agua.

En trabajos futuros se podrían considerar una mayor densidad de puntos de evaluación o realizar cálculos promedios en regiones específicas. Resultaría interesante estudiar el comportamiento en distintas zonas de las plataformas, así como evaluar en diferentes isóbatas, ya que la isóbata de los 200 m se encuentra en el límite de la región costera, un estudio alrededor de los 100 a los 150 m podría definir mejor el comportamiento de la plataforma externa. También, estudiar con detenimiento la potencia espectral a distintas profundidades en ciertas plataformas, ya que hubo algunos perfiles donde ésta incrementaba a mayor profundidad con forzamiento atmosférico. Asimismo, se pueden plantear estudios que se enfoquen en los procesos energéticos, por ejemplo, la transferencia de momento del viento al océano y las escalas verticales asociadas a la propagación de energía turbulenta y su configuración en cada plataforma continental.

# Referencias

- Adcroft, A. and Hallberg, R. (2006). On methods for solving the oceanic equations of motion in generalized vertical coordinates. *Ocean Modelling*, 11(1-2):224–233.
- Apel, J. R. (1987). *Principles of ocean physics*. Academic Press.
- Chassignet, E. P., Hurlburt, H. E., Smedstad, O. M., Halliwell, G. R., Hogan, P. J., Wallcraft, A. J., Baraille, R., and Bleck, R. (2007). The hycom (hybrid coordinate ocean model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 65(1-4):60–83.
- Chu, P. P., Ivanov, L. M., and Melnichenko, O. V. (2005). Fall–winter current reversals on the texas–louisiana continental shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 35(5):902–910.
- Cushman-Roisin, B. and Beckers, J.-M. (2011). *Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects*. Academic press.
- Danielson, G. C. and Lanczos, C. (1942). Some improvements in practical fourier analysis and their application to x-ray scattering from liquids. *Journal of the Franklin Institute*, 233(5):435–452.
- Duchon, C. E. (1979). Lanczos filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 18(8):1016–1022.
- Hall, C. A. and Leben, R. R. (2016). Observational evidence of seasonality in the timing of loop current eddy separation. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 76:240–267.
- Halliwell, G. R. (2004). Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the hybrid-coordinate ocean model (hycom). *Ocean Modelling*, 7(3-4):285–322.
- Hurlburt, H. and Thompson, J. D. (1980). A numerical study of loop current intrusions and eddy shedding. *Journal of Physical Oceanography*, 10(10):1611–1651.
- Langton, C. and Levin, V. (2017). The intuitive guide to fourier analysis and spectral estimation. *Ist edition, USA: Mountcastle Company*.

- Liu, Y. and Weisberg, R. H. (2012). Seasonal variability on the west florida shelf. *Progress in Oceanography*, 104:80–98.
- Martínez-López, B. and 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.
- Menke, W. and Menke, J. (2016). *Environmental data analysis with Matlab*. Academic Press.
- Morey, S. L., Zavala-Hidalgo, J., and 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. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 161:203–218.
- Muller-Karger, F. E., Smith, J. P., Werner, S., Chen, R., Roffer, M., Liu, Y., Muhling, B., Lindo-Atichati, D., Lamkin, J., Cerdeira-Estrada, S., et al. (2015). Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore gulf of mexico. *Progress in Oceanography*, 134:54–76.
- NOAA, N. (2011). The gulf of mexico at a glance: a second glance. *US Dept of Commerce, Washington, DC*.
- Ochoa, J., Sheinbaum, J., Badan, A., Candela, J., and Wilson, D. (2001). Geostrophy via potential vorticity inversion in the yucatan channel. *Journal of Marine Research*, 59(5):725–747.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el mesozoico al presente en el contexto regional del golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1):19–42.
- Pedlosky, J. et al. (1987). *Geophysical fluid dynamics*, volume 710. Springer.
- Prabhu, K. M. (2014). *Window functions and their applications in signal processing*. Taylor & Francis.
- Proakis, J. G. and Manolakis, D. G. (1992). Digital signal processing. *MPC, New York*.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G. M., Gelfenbaum, G., and Voigt, B. (2005). Seasonal to interannual morphodynamics along a high-energy dissipative littoral cell. *Journal of Coastal Research*, 21(3):553–578.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., et al. (2010). The ncep climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8):1015–1058.

- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H.-y., Iredell, M., et al. (2014). The ncep climate forecast system version 2. *Journal of climate*, 27(6):2185–2208.
- Salazar, E., Zavala-Hidalgo, J., and Silva, R. (2010). Comparación de las características de los modelos de circulación oceánica para estudios regionales: el caso del roms, hycom y ncom. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay. Artículo No. 285. ISBN: 978-9974-0-0690-4*, page 9 pp.
- Sansón, L. Z., González-Villanueva, A., and Flores, L. (2010). Evolution and decay of a rotating flow over random topography. *Journal of fluid mechanics*, 642:159–180.
- Sanvicente-Añorve, L., Zavala-Hidalgo, J., Allende-Arandía, E., and Hermoso-Salazar, M. (2018). Larval dispersal in three coral reef decapod species: Influence of larval duration on the metapopulation structure. *PloS one*, 13(3):e0193457.
- Schmitz Jr, W., Biggs, D., Lugo-Fernandez, A., Oey, L.-Y., and Sturges, W. (2005). A synopsis of the circulation in the gulf of mexico and on its continental margins. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 161:11–29.
- Sturges, W. and Leben, 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.
- Talley, L. D. (2011). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic press.
- Thomson, R. E. and Emery, W. J. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography*. Newnes.
- Vázquez De La Cerda, A., Reid, R. O., DiMarco, S. F., and Jochens, A. (2005). Bay of campeche circulation: An update. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 161:279–293.
- Weisberg, R. H. and 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).
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volume 100. Academic press.
- Yoskowitz, D., Leon, C., Gibeaut, J., Lupher, B., Lopez, M., Santos, C., Sutton, G., and McKinney, L. (2013). Gulf 360: state of the gulf of mexico. *Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Corpus Christi, TX: Texas A&M University-Corpus Christi*.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., and 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).

Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Morey, S. L., and 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.

Zavala Sansón, L. (2022). Effects of mesoscale turbulence on the wind-driven circulation in a closed basin with topography. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, pages 1–26.

# Apéndice A

## Espectros del análisis multianual

En este apartado se encuentran los espectros calculados en superficie para el análisis multianual, donde se consideraron los 22 años en total, generando series de 8030 días en promedio. Sólo se colocaron los espectros en superficie con fin ilustrativo de los métodos empleados para obtener los perfiles verticales de potencia y coeficiente rotatorio, ya que serían demasiadas figuras en el apéndice si se incluyeran los espectros de todas las profundidades.

En las Figuras A.1 y A.2 se muestran los espectros de Fourier calculados en superficie para todos los puntos de evaluación en las isóbatas de 50 m y 200 m, respectivamente, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore*. Por otro lado, en las Figuras A.3 y A.4 se muestran los espectros rotatorios calculados en superficie para todos los puntos de evaluación en las isóbatas de 50 m y 200 m, respectivamente. Todas las figuras muestran los resultados para ambos experimentos, sin forzamiento atmosférico y con forzamiento atmosférico.

Al estimar los espectros también se realizó una prueba de significancia de los picos espectrales, considerando la hipótesis nula de que cualquier pico en cualquier frecuencia en el registro surgió únicamente por variaciones aleatorias (Menke and Menke, 2016).

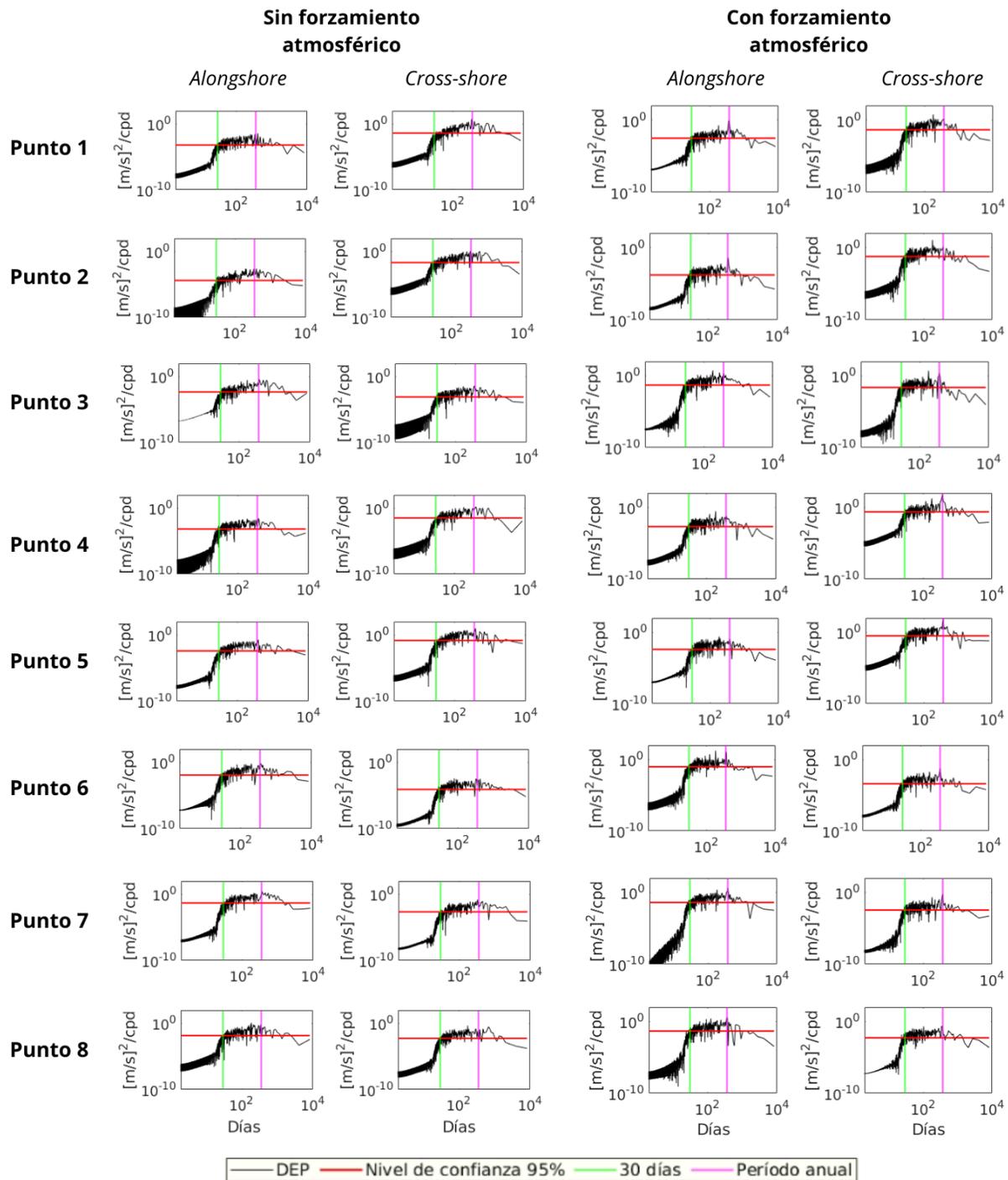


Figura A.1: Espectros de Fourier en superficie calculados para los ocho puntos de evaluación en la isóbata de 50 m, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95 %, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual.

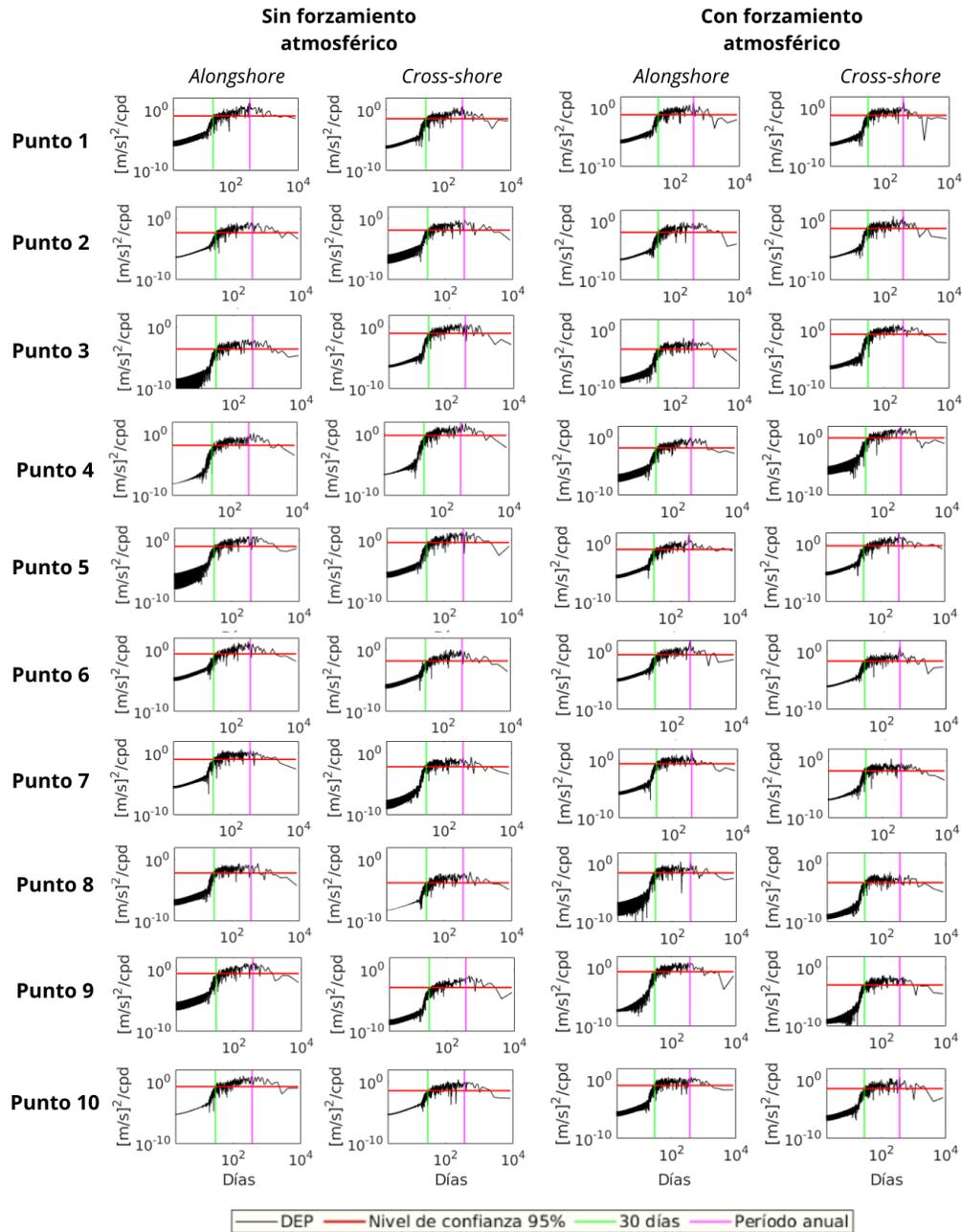


Figura A.2: Espectros de Fourier en superficie calculados para los diez puntos de evaluación en la isóbata de 200 m, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95 %, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual.

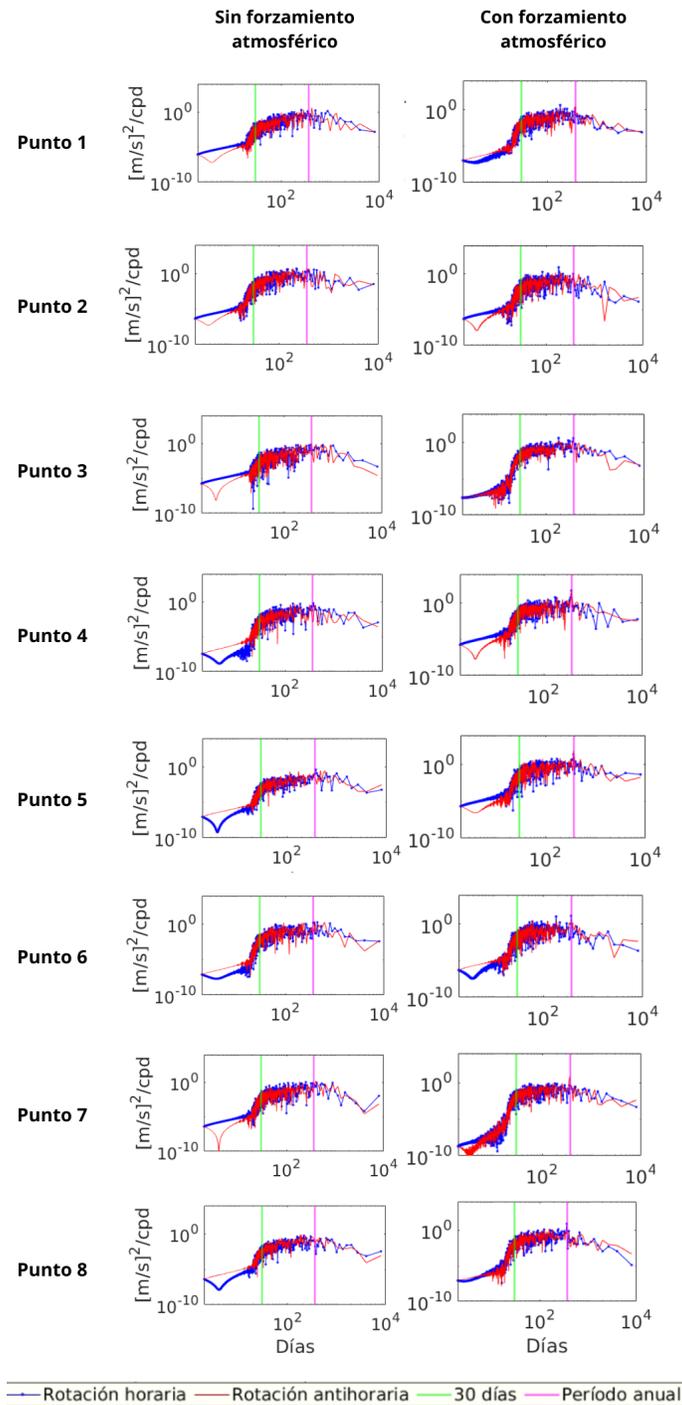


Figura A.3: Espectros rotatorios en superficie calculados para los ocho puntos de evaluación en la isóbata de 50 m, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. La curva azul representa la rotación horaria y la curva roja la rotación antihoraria, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual.



# Apéndice B

## Espectros del análisis estacional

En este apartado se encuentran los espectros calculados en superficie para el análisis estacional, donde se consideraron solamente todos los días de un mes en específico de todos los años. Se usaron enero, julio y octubre con 682 días para cada uno, y para abril fueron 660 días.

En la Figura B.1 se muestran los espectros para el punto de evaluación 5 en la isóbata de 50 m y en la Figura B.2 se muestran los espectros para el punto de evaluación 4 en la isóbata de 200 m. Estos puntos se encuentran en la misma zona, en TAVE, frente a las costas de Tamaulipas. Se decidió incluir sólo un punto dada la gran cantidad de figuras generadas, el propósito es meramente ilustrativo. La escala del eje X (días) no se modificó para poder remarcar que las series son más cortas que aquellas en el análisis multianual.

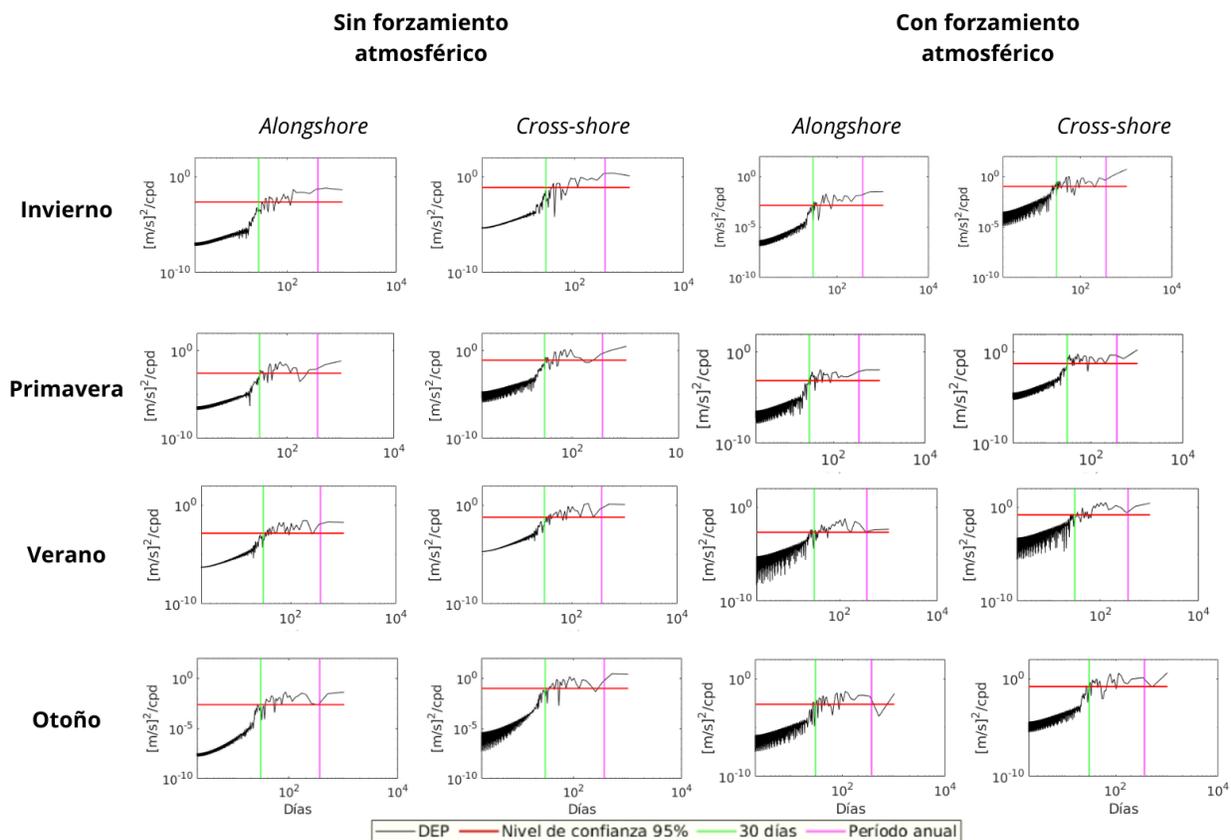


Figura B.1: Espectros de Fourier en superficie calculados para el punto de evaluación 5, en la isóbata de 50 m, en TAVE, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. En cada renglón se muestra la estación correspondiente. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95%, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual.

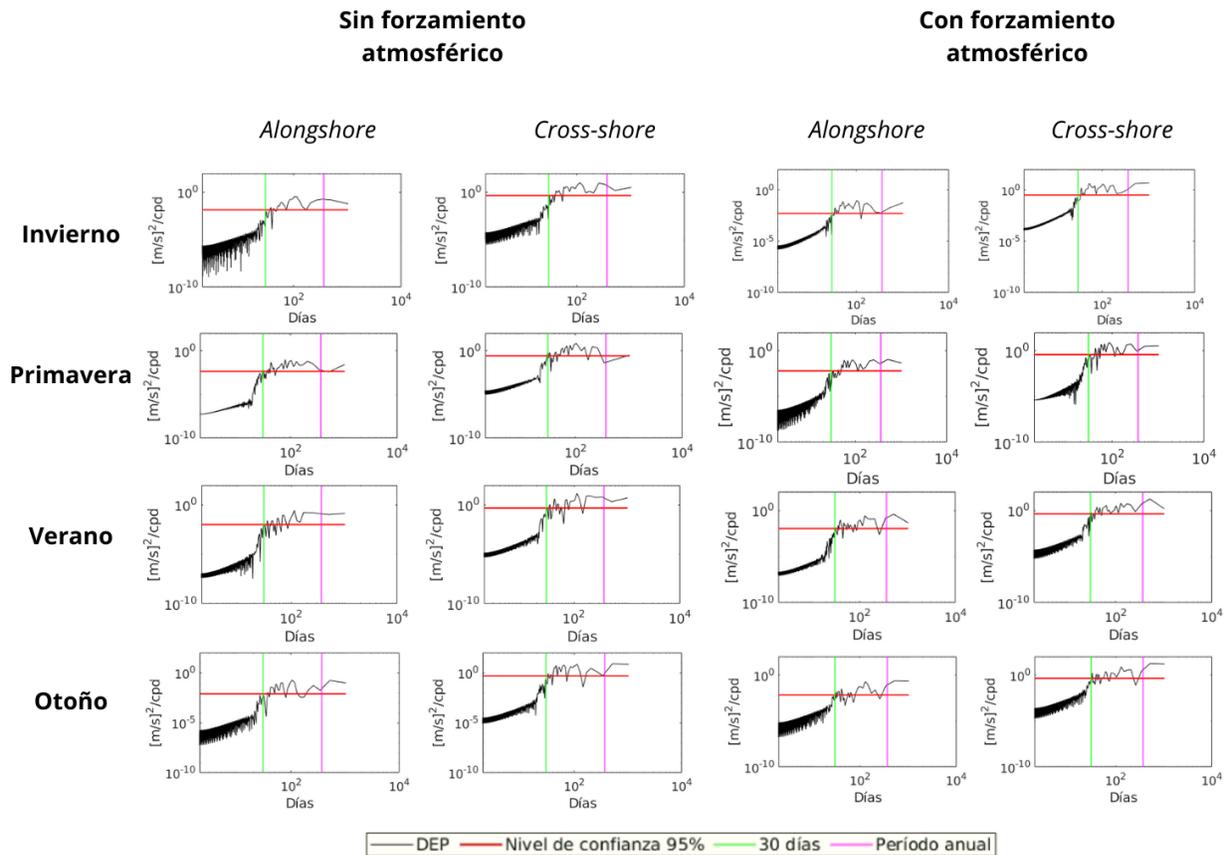


Figura B.2: Espectros de Fourier en superficie calculados para el punto de evaluación 4 en la isóbata de 200 m, en TAVE, para ambas componentes de velocidad, *alongshore* y *cross-shore* para los experimentos con forzamiento atmosférico y sin forzamiento atmosférico. En cada renglón se muestra la estación correspondiente. La curva negra es la densidad espectral de potencia (DEP), la línea horizontal roja es el nivel de confianza a un 95 %, la línea vertical verde el período de corte del filtro pasa bajas, de 30 días, y la línea horizontal rosa el período anual.