



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y OCEANOGRÁFICAS
PROGRAMA DE MAGISTER EN CIENCIAS MENCIÓN
OCEANOGRAFÍA

RESPUESTA DEL GOLFO DE ARAUCO AL PASO DE
CICLONES EXTRATROPICALES DURANTE EL
PERIODO INVERNAL

JOSSELYN NATHALY CONTRERAS ROJAS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
OCEANOGRAFÍA

PROFESOR GUÍA:
DR. MARCUS SOBARZO

DICIEMBRE, 2023
CONCEPCIÓN, CHILE



©Josselyn Contreras Rojas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Universidad de Concepción Dirección de Postgrado

La tesis de Magister en Ciencias con mención en Oceanografía titulada “Respuesta del golfo de Arauco al paso de ciclones extratropicales durante el periodo invernal”, de la Srta. Josselyn Contreras Rojas y realizada bajo la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente Comisión de Evaluación:

Profesor(a)

Firma

Dr. Marcus Sobarzo

Profesor Guía

Departamento de Oceanografía

Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas

Universidad de Concepción

Dra. Odette Vergara

Miembro Comité de Tesis

Departamento de Física

Facultad de Ciencias

Universidad del Bío-Bío

Dr. Gonzalo Saldías

Miembro Comité de Tesis

Departamento de Física

Facultad de Ciencias

Universidad del Bío-Bío

Dr. Diego Narváez

Director de Programa de Magíster

Departamento de Oceanografía

Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas

Universidad de Concepción

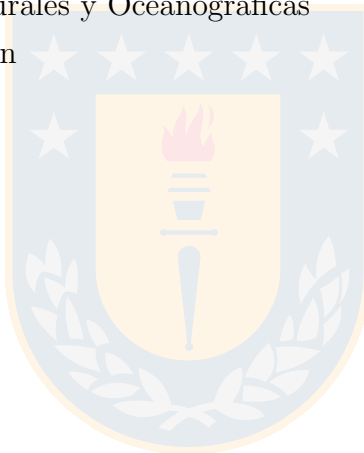
Dra. Catalina Aguirre

Evaluadora Externa

Escuela de Ingeniería Oceánica

Facultad de Ingeniería

Universidad de Valparaíso



Curriculum Vitae

Josselyn Nathaly Contreras Rojas

Nacida el 26 de Octubre de 1992, en Concepción, Chile

2011-2016: Licenciada en Geofísica, Universidad de Concepción, Chile

2016-2017: Geofísica, Universidad de Concepción, Chile

2017-2018: Diplomado en Oceanografía Observacional, Alfred Wegener Institute, Helgoland, Alemania

2020-2023: Magíster en Ciencias con mención en Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile

PUBLICACIONES

Mardones, P., Wong, Z., **Contreras-Rojas, J.**, Muñoz, R., Hernández-Miranda, E., & Sobarzo, M. (2022). Upwelling Shadows Driven by the Low-Level Jet Along the Subtropical West Coast of South America: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(8), e2021JC017979. <https://doi.org/10.1029/2021JC017979>

ÁREAS DE INVESTIGACIÓN

Principal: Oceanografía Física

Secundaria: Modelación Hidrodinámica

EXPERIENCIA LABORAL

Investigación

2021-2023: Asistente de investigación en Programa de Estudios Ecosistémicos del golfo de Arauco (PREGA)/ Línea Modelación. Universidad de Concepción.

2021-2022: Asistente de investigación en Programa de Investigación para la Planificación de la Acción Climática (CLAP).

2019-2020: Asistente de investigación en Programa de Estudios Ecosistémicos del golfo de Arauco (PREGA)/ Línea Observacional. Universidad de Concepción.

2019: Asistente de investigación en proyecto Fondecyt de Iniciación 11161091, COPAS Sur-Austral.

2016-2017: Asistente de investigación en Chilean Integrated Ocean Observing System (CHIOOS)

2015: Asistente de investigación en proyecto Corfo 14IDL2-29122. Universidad Austral de Chile

Ayudante en asignaturas

2021-01: Fundamentos de programación y manejo de datos oceanográficos en MATLAB, Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción.

2017-01: Física II, Departamento de Física, Universidad de Concepción.

2016-01: Introducción a la Geofísica, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

2013-01: Oscilaciones y Ondas, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

CONGRESOS

XLI Congreso de Ciencias del Mar. Exploración de zonas favorables para el desarrollo de la cojinoba en Coquimbo bajo un escenario de cambio climático. **J. Contreras-Rojas**, C. Parada, S. Cornejo, L. Ramajo, C. Álvarez.

XXXIX Congreso de Ciencias del Mar. Intercambio de agua entre el golfo de Arauco y el océano exterior. **J. Contreras-Rojas**, O. Vergara, M. Sobarzo.

V Congreso de oceanografía física, meteorología y clima del Pacífico Sur-Oriental. Patrones de circulación estacionales del Golfo de Arauco a partir de simulaciones ROMS. **J. Contreras-Rojas**, C. Parada.

V Congreso de oceanografía física, meteorología y clima del Pacífico Sur-Oriental. Patrones de dispersión y residencia de contaminantes asociados a emisarios submarinos al interior del Golfo de Arauco. **J. Contreras-Rojas**, C. Parada.

XXXVII Congreso de Ciencias del Mar. Dispersión y residencia de contaminantes en la costa del Golfo de Arauco: Impacto en el litoral costero. **J. Contreras-Rojas**.

XXXVII Congreso de Ciencias del Mar. Modelación y dispersión de contaminantes, comparación de modelos de seguimiento de petróleo e impactos en la costa. Caso de estudio del derrame de petróleo en la bahía de San Vicente. **J. Contreras-Rojas**, C. Parada, P. Mardones.

CURSOS Y WORKSHOPS

Mar - 2023: Modelación Regional Oceánica, Huinay Seasonal School - Fundación San Ignacio del Huinay.

Ene - 2022: Modelación ecosistémica: teoría y práctica con Atlantis, Universidad de

Concepción.

Oct - 2017: Curso en Ciencias Marinas: Oceanografía biogeoquímica y clima, Alfred Wegener Institute.

Dic - 2015: Curso de sistemas carbónicos en el océano, Universidad de Concepción.

Oct - 2014: First Workshop on Wave and Tidal Energy, Universidad Austral de Chile

Ago - 2013: Workshop on Remote Ocean Sensing, Universidad de Concepción.

PREMIOS

1er lugar en tesis en 3 minutos, versión 2023, Universidad de Concepción.

OTRAS HABILIDADES

Idiomas: Español/Inglés

Sis. Op.: Linux, Windows, Mac.

Software : GMT, LaTeX, Ocean Data View, SAGA.

Lenguajes de programación: Matlab, R, Python

Modelos: ROMS/CROCO, Ichthyop, ERGOM



Índice general

Resumen	XIX
Abstract	XX
1 Introducción	1
1.1 Hipótesis	6
1.2 Objetivo general	6
1.3 Objetivos específicos	6
2 Materiales y Métodos	7
2.1 Ciclones extratropicales	7
2.1.1 Modelo de seguimiento de ciclones	7
2.1.2 Selección de ciclones migratorios	8
2.2 Corrientes oceánicas	9
2.2.1 Datos de corrientes	9
2.2.2 Datos nivel del mar	11
2.2.3 Datos de caudal del río Biobío	11
2.2.4 Obtención y análisis de las corrientes submareales	11
3 Resultados	14
3.1 Comparación ERA5 con datos locales	14
3.2 Caracterización de los ciclones extratropicales	15
3.3 Circulación invernal del golfo de Arauco	18
3.3.1 Corrientes medias y ejes de máxima varianza	18
3.3.2 Análisis mareal de las corrientes	20
3.3.3 Espectros de frecuencia de la corriente submareal	20
3.4 Respuesta del golfo de Arauco al paso de ciclones extratropicales	22
3.4.1 Campaña 2016	23
3.4.2 Campaña 2018	26

3.5	Relación entre el viento y las corrientes	31
3.5.1	Modos de variabilidad de las corrientes	31
3.5.2	Correlación entre el viento y los modos de variabilidad de las corrientes	35
3.5.3	Ondeletas de coherencia entre el viento y corrientes	39
4	Discusión	44
4.1	Paso de ciclones extratropicales sobre Chile central	44
4.2	Respuesta del golfo de Arauco al paso de ciclones extratropicales	45
4.3	Implicaciones ambientales	48
5	Conclusión	51
	Bibliografía	53



Índice de figuras

1.1	Ubicación de CASC en los sistemas de borde oriental. Extraído de Largier (2020)	2
1.2	Relación de altura-profundidad en el GA y zona costera aledaña. La barra de colores indica los metros sobre o bajo el nivel del mar de la zona de estudio. Se indican también el cañón del Bío Bío, la desembocadura del río Bío Bío (RBB) y la isla Santa María (ISM) y Punta Lavapié (PL). El borde superior izquierdo muestra la ubicación de la zona de estudio en Sudamérica.	3
1.3	(a) Presión a nivel del mar (hPA) para los meses de verano (DEF) en rojo y para los meses de invierno (JJA) en azul. (b) Diferencia en la velocidad del viento a 10 m de altura (m/s) entre el periodo de verano (DEF) y el de invierno (JJA). (Figura extraída de Rahn y Garreaud 2014)	4
1.4	Patrones de circulación en la bahía de Monterrey durante eventos de viento favorables a la subsidencia. (Figura extraída de Paduan et al. 2018)	5
2.1	Grilla de ERA5 sobre el golfo de Arauco (puntos negros). En cuadrados se presentan las posiciones de las estaciones meteorológicas y en un círculo del mismo color la serie tomada para la comparación de presión y viento. En círculo amarillo se observa la posición del viento seleccionado para los análisis de viento sobre el golfo de Arauco.	8
2.2	Mapa de la costa oeste de Chile. La región de borde azul indica la zona donde se estudian las trayectorias de ciclones migratorios. La región roja representa la zona de origen para las bajas costeras.	9

2.3	Ubicación geográfica de los datos estudiados. Las ubicaciones de los ADCPs se presentan en azul con círculos rojos. Los cuadrados naranjos indican la ubicación de las estaciones meteorológicas y del punto de viento de ERA5. En círculos rojos se observan los dos puntos de la grilla de datos de nivel del mar utilizados en este trabajo.	10
3.1	Diagrama de dispersión de los datos de viento zonal, meridional y presión a nivel del mar entre ERA5 y los observados en Carriel Sur (paneles superiores) y Punta Hualpén (paneles inferiores). En la esquina inferior se muestra el respectivo coeficiente de correlación de Pearson (R).	15
3.2	(a) Distribución de la duración de los ciclones identificados al interior de la región de estudio.(b) Promedio mensual y desviación estandar de ciclones presentes en el área de estudio para el periodo 1979-2020. (c) Total de ciclones detectados al año (azul) y durante los meses de invierno (rojo) de cada año. La tendencia lineal de cada serie esta indicada por las líneas segmentadas	16
3.3	Componente meridional del viento (ERA5) durante la presencia de ciclones sobre la región de estudio. Los valores positivos indican viento desde el sur, mientras que los valores negativos indican viento desde el norte.	17
3.4	(a) Distribución del viento meridional desde el norte, junto al percentil 5, promedio y mediana. (b) Número de DVNI por mes en azul y DVNI en paralelo a la presencia de un ciclón extratropical en naranja. (c) Posición del centro de los ciclones extratropicales presentes durante DVNI. La barra de colores indica el radio estimado del ciclón. DVNI: Día de viento norte intenso.	17
3.5	(a) Dirección promedio del eje de máxima varianza (EMV) para cada periodo de estudio. La flecha indica la dirección positiva del EMV. Profundidad versus (b) Inclinación en grados del EMV con respecto al norte, (c) porcentaje de varianza explicado por el EMV.	18
3.6	Estructura vertical promedio de la corriente total a lo largo del EMV (azul) y del EOv (rojo). En sombras se indica la desviación estándar. Los porcentajes corresponden a la varianza total contenida en cada eje.	19

3.7	(a) Estructura vertical del porcentaje de varianza de la corriente total explicado por la corriente de marea. Autoespectro del nivel del mar en (b) BC y (c) PD durante el periodo 2016 y 2018. Las líneas negras entrecortadas indican la frecuencia (cph) de las principales componentes mareales con las cuales se calculó el parámetro de forma F.	20
3.8	Espectros de frecuencia de las corrientes rotadas al EMV (paneles izquierdos) y EOY (paneles derechos) registrada por el anclaje (a-b) BC2016, (c-d) BC2018, (e-f) PD2016 y (g-h) PD2018. Las líneas segmentadas negras encierran la banda de frecuencia sinóptica (2-16 días).	22
3.9	(a) Serie de tiempo del mes de junio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).	23
3.10	(a) Serie de tiempo del mes de julio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).	24
3.11	(a) Serie de tiempo del mes de agosto para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).	25

- 3.12 (a) Serie de tiempo del mes de septiembre para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta). 27
- 3.13 (a) Serie de tiempo del mes de mayo para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta). 28
- 3.14 (a) Serie de tiempo del mes de junio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta). 29

3.15	(a) Serie de tiempo del mes de julio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).	30
3.16	(a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Boca Chica durante la campaña 2016. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de Ur presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5. . .	32
3.17	(a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Boca Chica durante la campaña 2018. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de Ur presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5. . .	33
3.18	(a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Punta Delicada durante la campaña 2016. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de Ur presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5.	33
3.19	(a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Punta Delicada durante la campaña 2018. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de Ur presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5.	34

3.20	(a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de las corrientes en Boca Chica y Punta Delicada durante la campaña 2018. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal rotada en BC. Estructura vertical del (d) primer y (e) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal rotada en PD.	35
3.21	Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto a la componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2016. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2016.	36
3.22	Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2018. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2018.	37
3.23	Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2016. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2016.	38
3.24	Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2018. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2018.	38

3.25	Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal de las corrientes en BC y PD durante la campaña 2018. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC y PD durante la campaña 2018	39
3.26	Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Boca Chica durante la campaña 2016. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.	40
3.27	Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Boca Chica durante la campaña 2018. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.	40
3.28	Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Punta Delicada durante la campaña 2016. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.	41
3.29	Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Punta Delicada durante la campaña 2018. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.	42
3.30	Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Boca Chica y Punta Delicada durante la campaña 2018. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.	42

- 4.1 (a) Promedio del viento en Punta Hualpén junto a su desviación estándar. En negro se muestra el tiempo promedio en el que aparece un ciclón extratropical en la zona antes del viento norte máximo. Compuesto de las corrientes para (b) BC2016, (c) BC2018, (d) PD2016 y (e) PD2018. 47



Índice de tablas

2.1	Especificaciones de los datos de corrientes disponibles. * Los datos de BC para el periodo del 20 de septiembre al 25 de septiembre de 2016 no se encuentran disponibles debido a un error en el instrumento encargado de la toma de datos.	10
3.1	Análisis estadístico comparativo entre los datos de ERA5 y las observaciones de presión a nivel del mar, viento zonal y meridional anuales y separadas por estación del año. PH: Punta Hualpén y CS: Carriel Sur	14



Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, cuyo apoyo y amor constante han sido un pilar fundamental en mi formación tanto académica como personal. Un agradecimiento especial a mi hermano y sobrino, cuyas risas me iluminaron en mis momentos más desafiantes. Un gran agradecimiento a mis amigos, esos que me acompañan desde siempre y a los que conocí gracias a esta aventura, especialmente a mi club de Lulú que me abrazó y cuidó a lo largo de todo este postgrado. A los minions por el apoyo constante. A la Almendra y la Oliva por acompañarme fielmente durante todas las horas de escritura de este documento. Quisiera agradecer también a mi segunda mamá, mi tía Paty, quien me apoyó incondicionalmente al comienzo de este viaje y que aunque ya no me acompaña físicamente, permanece en mi memoria y corazón.

Agradezco a mi profesor guía, Marcus Sobarzo por sus valiosas observaciones y por darme la oportunidad de entrar al mundo de la Oceanografía Observacional. También agradezco a la Dra. Odette Vergara por su amistad, por su confianza en mi trabajo y sus palabras de apoyo constante. A Fabiola Gaete por su eficiencia y buena voluntad para resolver cada duda administrativa que tuve. También agradezco a la comunidad universitaria y en especial al Departamento de Oceanografía, por brindarme una educación de excelencia y un espacio de aprendizaje agradable. Un agradecimiento especial a la Dra. Martina Messmer y la Dra. Catalina Aguirre por ayudarme a descifrar el funcionamiento del modelo de seguimiento de ciclones y por su generosidad al compartir sus scripts conmigo.

Finalmente agradecer el apoyo económico entregado por la Dirección de Postgrado, el proyecto PREGA y COPAS-COASTAL los cuales financiaron distintas etapas de este proceso.

Resumen

El Golfo de Arauco (GA), situado en las costas de la región del Biobío, es el cuerpo de agua semicerrado más grande de Chile central. Esta región ha sido ampliamente estudiada durante los meses estivales, época en que las condiciones atmosféricas favorecen una intensa surgencia. En contraste, durante el invierno, caracterizado por un aumento en el paso de sistemas de baja presión atmosférica, conocidos como ciclones extratropicales, los estudios son más limitados. Esto ha resultado en un conocimiento insuficiente sobre las dinámicas invernales del GA, especialmente bajo la influencia de estos fenómenos atmosféricos. Esta investigación aborda esta brecha, concentrándose en cómo la región occidental del GA responde a la presencia de estos ciclones extratropicales y a los cambios asociados en los patrones de viento, con el fin de entender mejor las dinámicas invernales y el intercambio de agua con el océano exterior en esta región.

Para llevar a cabo este estudio, se caracterizó el paso de ciclones extratropicales a partir de campos de presión atmosférica (1979-2020) y su efecto sobre el viento meridional en la región. Utilizando estos resultados, se evaluó la respuesta de las corrientes en las conexiones del Golfo de Arauco con el océano, mediante observaciones de ADCP en la boca Chica (BC) y en la región occidental de la boca Grande (Punta Delicada; PD), en los inviernos de junio-septiembre 2016 y mayo-julio 2018. Adicionalmente se compararon los principales modos de variabilidad de las corrientes con el viento local a través de estudios de correlación y ondeletas de coherencia, revelando una influencia directa de los ciclones en la generación y modulación de las corrientes del GA.

Estos resultados sugieren que la respuesta hidrodinámica del GA al paso de ciclones extratropicales se debe principalmente a la influencia del viento norte asociado a estos sistemas. Estos vientos, al superar cierta intensidad, provocan un transporte superficial de agua en PD hacia el interior del GA. Esto crea un gradiente de presión que dirige un flujo de salida por BC y a través de las capas subsuperficiales de PD. A medida que la fuerza del viento norte disminuye, el flujo superficial en PD se atenúa, lo que permite que el agua salga a profundidades menores.

Este mecanismo sugiere un rol importante de los ciclones en la renovación de las aguas del GA, reduciendo potencialmente los tiempos de residencia del agua en el golfo. Por lo que estos hallazgos no solo aportan al entendimiento de la dinámica invernal del GA, sino que también pueden tener implicaciones significativas para la gestión ambiental y marina en la región.

Abstract

The Gulf of Arauco (GA), located along the coast of the Biobío region, is the largest semi-enclosed body of water in central Chile. This region has been extensively studied during the summer months when atmospheric conditions favor intense upwelling. In contrast, during winter, characterized by an increase in the passage of low atmospheric pressure systems, known as extratropical cyclones, studies are more limited. This has led to an insufficient knowledge of the GA's winter dynamics, especially under the influence of these atmospheric phenomena. This research addresses this gap, focusing on how the GA responds to the presence of these extratropical cyclones and the associated changes in wind patterns, in order to better understand the winter dynamics in this region.

To conduct this study, the passage of extratropical cyclones was characterized using atmospheric pressure fields (1979-2020) and their effect on the meridional wind in the region. Using these results, the response of the currents in the connections of the Arauco Gulf with the ocean was evaluated, through ADCP observations at Boca Chica (BC) and in the western region of Boca Grande (Punta Delicada; PD), during the winter periods of June-September 2016 and May-July 2018. Additionally, the main modes of current variability were compared with the local wind through correlation studies and coherence wavelets, revealing a direct influence of cyclones on the generation and modulation of the GA's currents.

These results suggest that the GA's hydrodynamic response to the passage of extratropical cyclones is mainly due to the influence of the northerly winds. These winds can cause a surface transport of water in PD towards the interior of the GA. This creates a pressure gradient that directs an outflow through BC and through the subsurface layers of PD. As the north wind decreases, the surface flow in PD attenuates, allowing the water to exit at shallower depths.

This mechanism suggests an important role of cyclones in the renewal of the waters of the GA, potentially reducing the residence times of water in the gulf. Therefore, these findings not only contribute to the understanding of the GA's winter dynamics but also may have significant implications for environmental and marine management in the region.

CAPÍTULO 1

Introducción

Las regiones de borde oriental de los océanos son reconocidas por ser áreas con una de las mayores producciones primarias en el océano mundial, destacándose por concentrar altas densidades de fitoplancton y una diversa variedad de vida marina. Estos ecosistemas prosperan gracias a un importante proceso oceanográfico conocido como surgencia costera, en el cual los vientos hacia el ecuador permiten que aguas subsuperficiales y frías asciendan a la superficie (Ekman, 1905), llevando consigo los nutrientes necesarios para sustentar la vida marina.

En estas regiones, los cuerpos de agua semicerrados (CASC), tales como golfos y bahías, destacan por concentrar aún más productividad biológica debido a su capacidad para retener las aguas ricas en nutrientes (Largier, 2020). Además, representan un refugio tanto para la biota marina como para los seres humanos, lo que ha llevado al desarrollo de ciudades costeras, tales como San Francisco (golfo de Farallones), Lisboa (bahía de Lisboa), Ciudad del Cabo (bahía Mesa y la bahía Falsa), Valparaíso (bahía de Valparaíso), Concepción (golfo de Arauco y bahía de Concepción) y Vigo (Ría de Vigo). Es importante destacar que gran parte de estos CASC se ubican entre los 30° y 60° de latitud en ambos hemisferios (Largier, 2020), región conocida como latitudes medias (figura 1.1). En estas regiones, sin embargo, las condiciones meteorológicas que fuerzan la surgencia inducida por viento no siempre se mantienen presentes durante todo el año. Por el contrario, las regiones de latitudes medias poseen una alta variabilidad estacional a lo largo del año, con estaciones húmedas o de tormentas que presentan, en algunos casos, condiciones diametralmente opuestas a las observadas durante estaciones favorables a la surgencia (García-Reyes y Largier, 2012).

Uno de estos CASC de latitudes medias es el golfo de Arauco (GA), el más extenso de Chile central, situado en la región del Biobío (entre 36° 45' y 37° 20' S). Con una superficie aproximada de 2000 km² es uno de los golfos con orientación norte más grandes en el Sistema de Corrientes de Humboldt. El GA tiene como límite sur a Punta Lavapié y como límite norte a la desembocadura del río Biobío, por lo que recibe las descargas de agua dulce de uno de los ríos más largos del país. En su extremo occidental se encuentra ubicada la isla Santa María que genera dos entradas de agua, la boca Grande al norte y la boca Chica al oeste (figura 1.2). La batimetría del GA presenta una suave pendiente

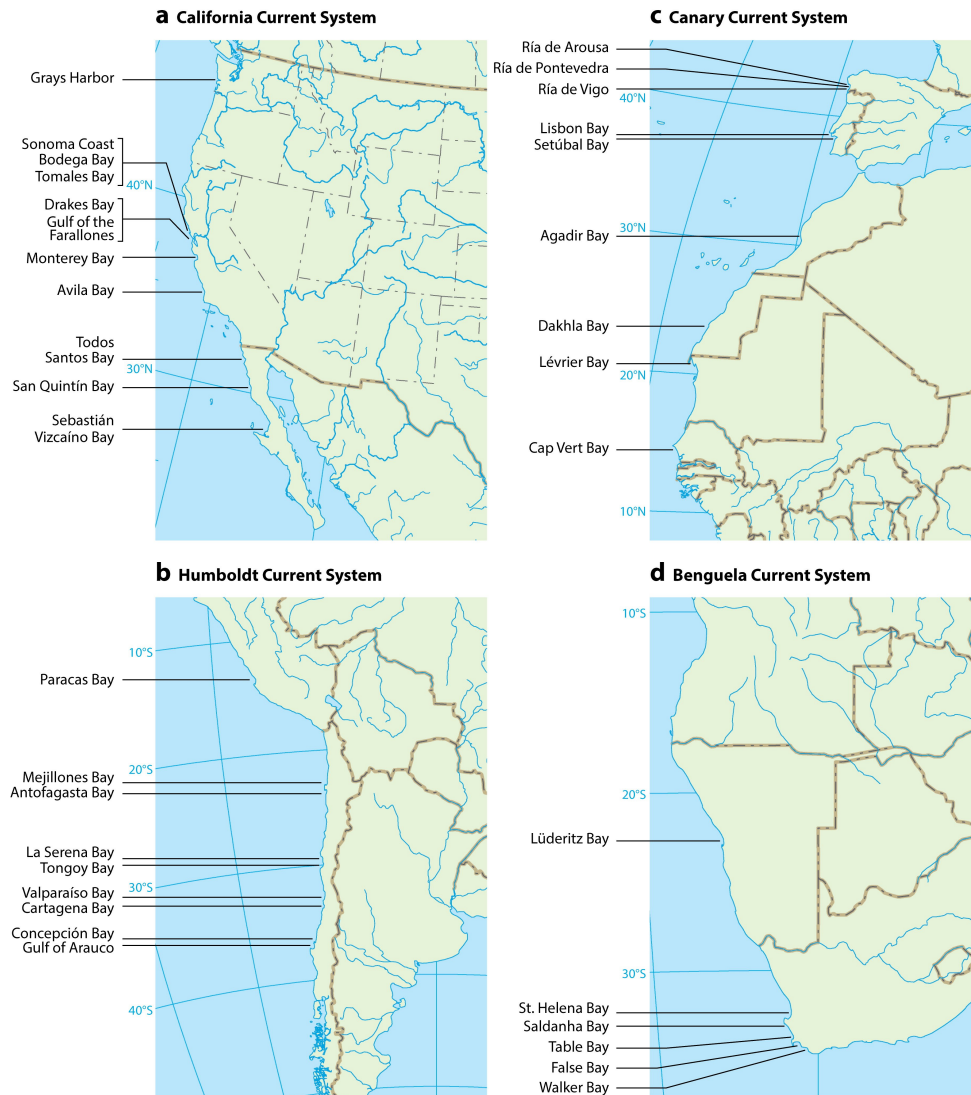


Figura 1.1: Ubicación de CASC en los sistemas de borde oriental. Extraído de Largier (2020)

con dirección N-S, siguiendo la línea de costa, pero se ve abruptamente interrumpida por el cañón submarino del Biobío, que alcanza profundidades de hasta 1200 metros (Sobarzo et al., 2016). Esta particular configuración ha permitido que el GA sea una de las regiones con mayor producción primaria en Chile (Daneri et al., 2000; Montero et al., 2007), convirtiéndolo en un área estratégica para diversas actividades de alta importancia económica en la región. Su singularidad y relevancia lo convierten en un área de gran interés para la investigación y la conservación marina.

Dada su ubicación en latitudes medias, las condiciones atmosféricas favorables a la surgencia inducida por viento solo duran una porción del año. Esto se debe a que los vientos que soplan sobre la superficie del GA están dominados principalmente por el Anticiclón del Pacífico Sur y su desplazamiento meridional a lo largo del año (figura 1.3).

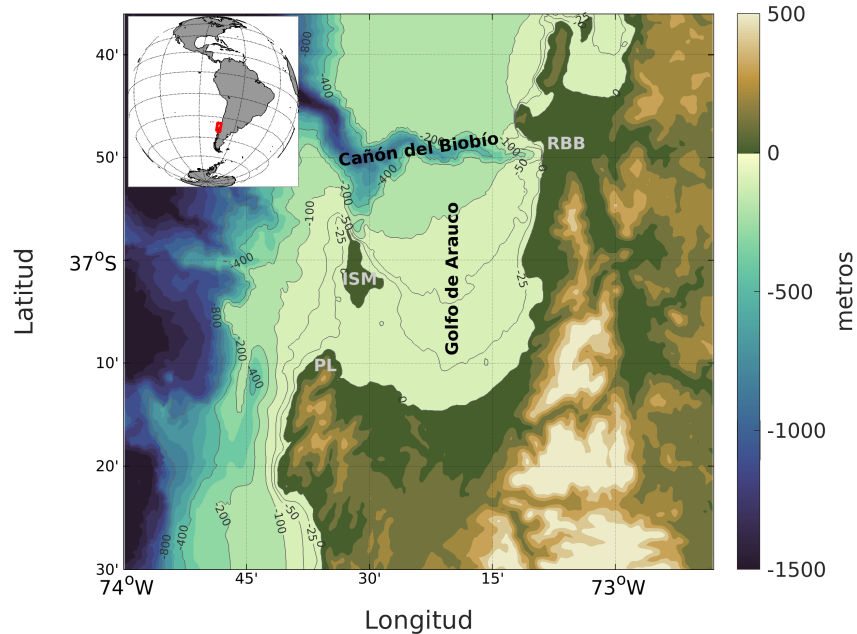


Figura 1.2: Relación de altura-profundidad en el GA y zona costera aledaña. La barra de colores indica los metros sobre o bajo el nivel del mar de la zona de estudio. Se indican también el cañón del Bío Bío, la desembocadura del río Bío Bío (RBB) y la isla Santa María (ISM) y Punta Lavapié (PL). El borde superior izquierdo muestra la ubicación de la zona de estudio en Sudamérica.

Durante la primavera y el verano austral, cuando el anticiclón se desplaza hacia el sur, los vientos desde el sur se vuelven más frecuentes, dando origen a una intensa surgencia (Rahn y Garreaud, 2014; Strub et al., 1998). Por el contrario, durante el invierno austral el desplazamiento del anticiclón al norte expone la zona a tormentas esporádicas, asociadas a viento desde el norte, con una duración entre 1 y 4 días, debido al paso de sistemas de baja presión (superficiales y de niveles altos) y los frentes superficiales asociados (Falvey y Garreaud, 2007; Saavedra y Foppiano, 1992). Estos sistemas de baja presión transientes reciben el nombre de ciclones extratropicales o de latitudes medias debido a la circulación de sus vientos y la latitud por donde pasan (Holton, 1973). En Chile central, la circulación atmosférica asociada a estos ciclones ha sido estudiada en algunos trabajos como los de Barrett et al. (2009, 2011) y Falvey y Garreaud (2007). Garreaud (2013) clasificó las tormentas de Chile central en frías y cálidas de acuerdo a su estructura térmica, donde las tormentas frías fueron mucho más frecuentes representando cerca del 70 % del total. Estas tormentas frías dan origen a un intenso viento norte a lo largo de Chile central el cual está asociado al paso de un ciclón en torno a 40°S (Barrett et al., 2009; Garreaud, 2013). Durante las tormentas cálidas los ciclones pasan comúnmente varios cientos de kilómetros más al sur (en torno a 60°S), por lo que el viento tiende a presentar una dirección más zonal sobre el GA (Garreaud, 2013).

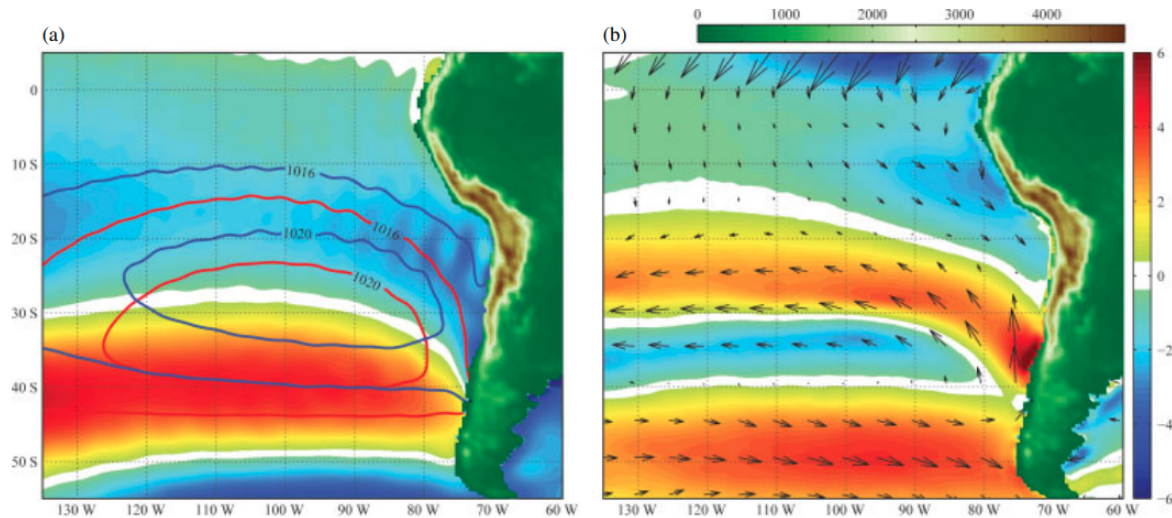


Figura 1.3: (a) Presión a nivel del mar (hPA) para los meses de verano (DEF) en rojo y para los meses de invierno (JJA) en azul. (b) Diferencia en la velocidad del viento a 10 m de altura (m/s) entre el periodo de verano (DEF) y el de invierno (JJA). (Figura extraída de Rahn y Garreaud 2014)

Durante el invierno, el cambio en la dirección del viento podría tener implicaciones importantes en la circulación del GA. Sin embargo, la escasez de estudios y observaciones durante esta estación ha limitado el conocimiento sobre cómo estos cambios atmosféricos afectan la hidrodinámica del golfo. Esta escasez se debe, en parte, al mayor interés y enfoque de investigación en los periodos de surgencia activa durante la primavera y el verano (Djurfeldt, 1989; Letelier et al., 2009; Parada et al., 2001; Sobarzo et al., 2001; Valle-Levinson et al., 2003). Como resultado, los estudios durante el invierno son escasos y generalmente se centran en la hidrografía de las bahías al interior del GA (Faundez-Baez et al., 2001; Sobarzo et al., 2007), en procesos asociados al cañón submarino del Biobío (Sobarzo et al., 2001, 2016) o al impacto de las descargas del río Biobío (Vergara et al., 2023). Aunque algunos estudios sugieren que la surgencia inducida por viento durante el invierno es un fenómeno poco frecuente y débil en comparación con los eventos de subsidencia asociados al paso de tormentas (Letelier et al., 2009), aún no se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva sobre la dinámica invernal del GA.

Dado este desconocimiento sobre la dinámica invernal del GA, es esencial recurrir a otros casos de CASC ubicados en latitudes medias para ilustrar posibles escenarios similares, tales como la bahía de Concepción, la bahía de Monterrey y las rías de Vigo y Pontevedra en la costa oeste de España. Estudios realizados en la bahía de Concepción, ubicada al norte del GA, indican que la dirección de la corriente superficial coincide con los vientos desde el norte durante el paso de tormentas y el agua tiende a converger en la costa (Ahumada et al., 1983). La bahía de Monterrey, ubicada en el sistema de borde

oriental de California, también se ve influenciada por ciclones extratropicales, los cuales provocan cambios en la dirección del viento, alternando entre periodos favorables a la surgencia y periodos favorables a la subsidencia. Durante los periodos de viento favorable a la subsidencia, las corrientes superficiales se dirigen hacia el polo en la región oceánica, mientras que las corrientes al interior del golfo siguen la línea de costa, dando origen a una circulación antihoraria (figura 1.4). Las corrientes de mayor intensidad se concentran en la región al sur y a lo largo de la boca de la bahía (Paduan et al., 2018).

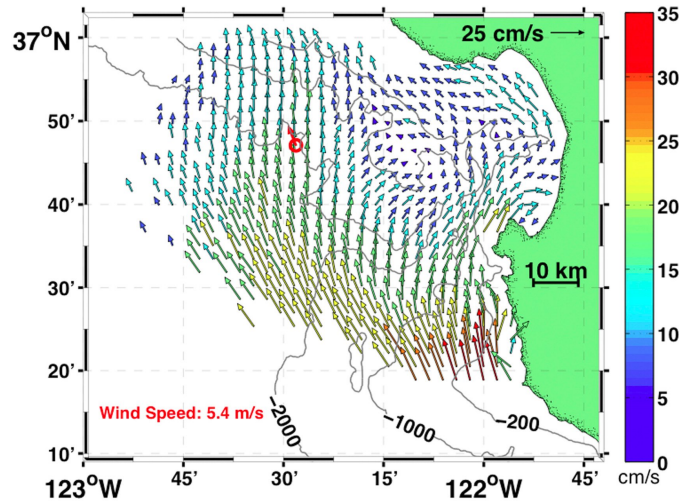


Figura 1.4: Patrones de circulación en la bahía de Monterrey durante eventos de viento favorables a la subsidencia. (Figura extraída de Paduan et al. 2018)

Por otro lado, las rías de Vigo y Pontevedra también presentan una variabilidad estacional marcada, con eventos de surgencia durante el verano y eventos de subsidencia durante el resto del año (Barton et al., 2015). Durante la surgencia, se estratifican debido a la intrusión de agua más fría y densa desde el exterior, generando una circulación típica de estuario con una salida de agua menos densa por la superficie. Sin embargo, cuando el viento cambia de dirección, el agua superficial de baja densidad entra a las rías, debilitando o invirtiendo la circulación estuarina y disminuyendo la salida de agua desde el interior de las rías (Barton et al., 2015; Cruz et al., 2021). Esta dualidad también se observa en el Pacífico nororiental, donde los vientos favorables a la surgencia generan un flujo costa afuera entre abril y junio, mientras que los vientos favorables a la subsidencia dan origen a un flujo hacia la costa durante la estación de tormentas (García-Reyes y Largier, 2012).

Se puede suponer que el comportamiento invernal del GA compartirá características con los ejemplos mencionados anteriormente, sin embargo esto sigue siendo una incógnita. La falta de estudios detallados durante esta estación ha limitado nuestra comprensión del ciclo anual de las corrientes al interior del GA y cómo los forzantes atmosféricos, como los ciclones extratropicales, influyen en los patrones de circulación durante el invierno.

Este trabajo pretende aportar al entendimiento de la dinámica invernal al interior de GA, a través de la determinación del rol del viento norte asociado al paso de ciclones extratropicales sobre los patrones de circulación al interior del GA. Se espera que este trabajo basado en el análisis de datos observacionales recopilados durante dos periodos invernales permita mejorar nuestra comprensión de la hidrodinámica de este importante cuerpo de agua semicerrado en latitudes medias.

1.1. Hipótesis

Sobre la base de los antecedentes expuestos anteriormente se consideran las siguientes hipótesis:

- Durante invierno, la circulación submareal al interior del GA presenta un patrón de circulación principalmente forzado por los vientos desde el norte, asociados al paso de ciclones extratropicales
- El viento norte asociado al paso de un ciclón de extratropical sobre la región fuerza una circulación superficial que permite el ingreso de agua al golfo a través de la boca grande y salida de agua por boca chica

1.2. Objetivo general

- Caracterizar la respuesta hidrodinámica del golfo de Arauco durante el paso de ciclones extratropicales en el periodo invernal

1.3. Objetivos específicos

- Caracterizar el paso de ciclones extratropicales durante el invierno sobre el golfo de Arauco y establecer su relación con los eventos de viento norte.
- Describir el comportamiento de las corrientes submareales al interior del golfo de Arauco durante eventos de ciclones extratropicales.
- Calcular los modos de variabilidad invernal dominantes de la circulación submareal en el golfo de Arauco.
- Analizar la relación entre los modos de variabilidad de las corrientes submareales y los eventos de viento norte asociados a ciclones extratropicales.

CAPÍTULO 2

Materiales y Métodos

La metodología del trabajo consistió en dos etapas. En primer lugar, se realizó el análisis atmosférico para determinar el paso de ciclones extratropicales sobre la región de estudio. Posteriormente se analizaron los datos oceanográficos disponibles y se contrastaron con los resultados obtenidos en el paso anterior.

2.1. Ciclones extratropicales

2.1.1. Modelo de seguimiento de ciclones

Para detectar la presencia de ciclones extratropicales en la zona de estudio, se empleó un modelo de rastreo desarrollado por la Universidad de Melbourne (Simmonds y Keay, 2000), el cual ha sido ampliamente utilizado para la identificación y seguimiento de ciclones y anticiclones (Aguirre et al., 2021; Papritz et al., 2014). Este algoritmo consta de dos componentes principales: la identificación de ciclones y el seguimiento de sus trayectorias. El reconocimiento de ciclones se basa en la detección de máximos/mínimos en el laplaciano de campos de presión atmosférica ($\nabla^2 p$) para reconocer sistemas de baja/alta presión. Las trayectorias de estos sistemas se obtienen a través de un proceso de tres pasos. En primer lugar se predice una posición posterior para cada ciclón, luego se calcula una probabilidad de identificación entre el ciclón proyectado y cada ciclón presente en el siguiente paso de tiempo y finalmente se establece una coincidencia (Simmonds y Keay, 2000).

Los datos utilizados para este estudio corresponden a los campos de presión atmosférica a nivel del mar (PNM) del reanálisis ERA5 para el período 1979-2020 (Hersbach et al., 2020). Estos campos grillados poseen una resolución horizontal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y temporal de 1 hora. Para optimizar los tiempos de cálculo y adaptarse a las dimensiones espaciales de los fenómenos estudiados, se redujo la resolución espacial a $1^\circ \times 1^\circ$ y la resolución temporal a 6 horas. Estos datos fueron obtenidos a través de la plataforma online (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), disponible gracias al Centro Europeo de Proyecciones Meteorológicas (ECMWF). Para evaluar la calidad de los datos de ERA5 sobre la región, se realizaron comparaciones punto a punto entre los datos horarios de ERA5 y dos estaciones costeras ubicadas en Punta Hualpén y Carriel Sur. La serie de Punta

Hualpén presenta datos horarios continuos durante el período 2014-2018, mientras que los datos de Carriel Sur presenta datos de forma irregular para el período 1979-2020. Las series de tiempo comparadas corresponden al punto más cercano a la ubicación real de las estaciones (figura 2.1).

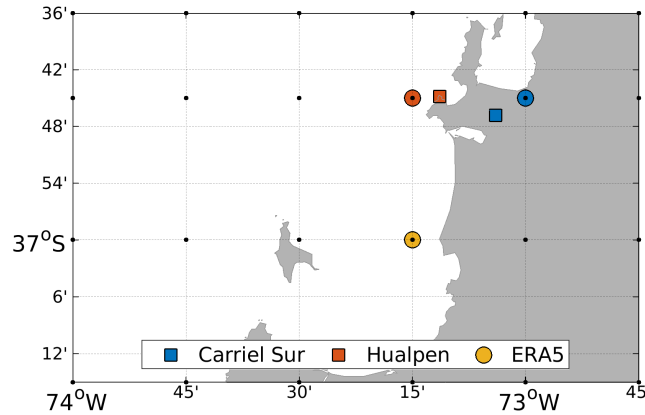


Figura 2.1: Grilla de ERA5 sobre el golfo de Arauco (puntos negros). En cuadrados se presentan las posiciones de las estaciones meteorológicas y en un círculo del mismo color la serie tomada para la comparación de presión y viento. En círculo amarillo se observa la posición del viento seleccionado para los análisis de viento sobre el golfo de Arauco.

2.1.2. Selección de ciclones migratorios

Para diferenciar los ciclones migratorios de otros tipos de sistemas ciclónicos reconocidos por el algoritmo (bajas costeras, bajas segregadas, etc) se establecieron una serie de criterios. En primer lugar, solo se consideraron los ciclones cuya trayectoria dura más de un día al interior de la región de estudio. Esta región corresponde a la zona entre los 30° y 50°S y los 70° y 90°O (Figura 2.2).

Para descartar las circulaciones ciclónicas que corresponden a bajas costeras se utilizó la metodología de Crespo et al. (2022), donde se define como baja costera a todas aquellas trayectorias que se originan entre 20° y 25°S y entre 71° y 76°O y que no se desplazan más de 1500 km. En este trabajo se amplió el área de origen hasta los 40°S y hasta los 78°O (Fig 2.2), dado que en la zona suelen aparecer este tipo de circulaciones al norte del golfo de Arauco (~36°S) (Mardones et al., 2022). Finalmente, solo se consideraron aquellas trayectorias con ciclones que presentan una presión inferior a los 1010 hPa, eliminando así cualquier posibilidad de incluir circulaciones ciclónicas aleatorias reconocidas por el algoritmo.

Posterior a esta selección, se caracterizó el paso de los ciclones extratropicales sobre la región de estudio. Esto se llevó a cabo mediante un análisis en el que se evaluaron diversos

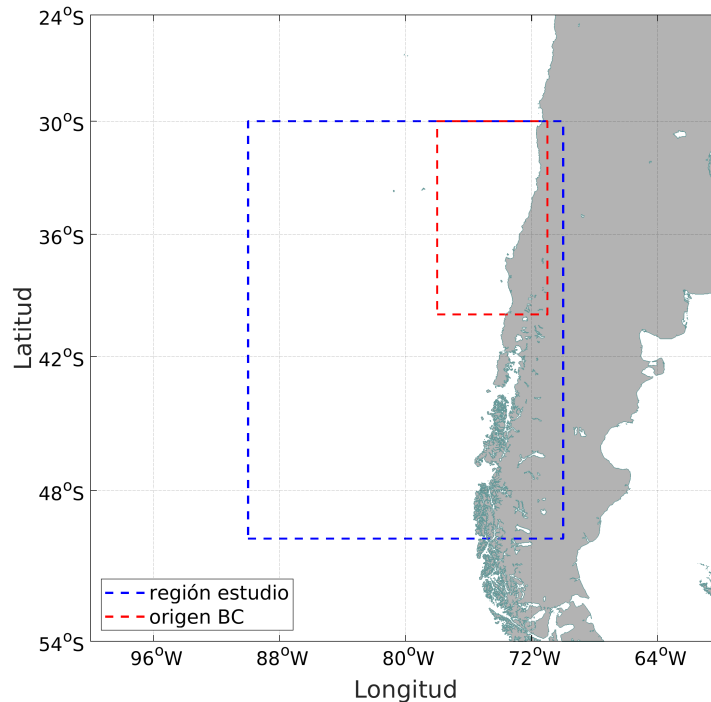


Figura 2.2: Mapa de la costa oeste de Chile. La región de borde azul indica la zona donde se estudian las trayectorias de ciclones migratorios. La región roja representa la zona de origen para las bajas costeras.

aspectos, como la duración de estos eventos, su frecuencia a lo largo del año y la tendencia durante los últimos 40 años. Se utilizó la componente meridional del viento ERA5 (figura 2.1) para examinar la relación entre el paso de ciclones sobre la región y la ocurrencia de días de viento norte intenso (DVNI). Los DVNI se definieron como aquellos días en los que se registran vientos del norte con magnitudes superiores al percentil 5 del viento total en dirección norte.

2.2. Corrientes oceánicas

2.2.1. Datos de corrientes

Este estudio utilizó datos de corrientes obtenidos mediante el uso de perfiladores acústicos de corriente por efecto Doppler (ADCP) de la marca Sontek. Estos instrumentos fueron colocados en el fondo marino con sus cabezales orientados hacia arriba para registrar las corrientes a lo largo de la columna de agua. Se instalaron en dos ubicaciones: Boca Chica (BC), a profundidades de 24 y 22 metros, y Punta Delicada (PD), a profundidades de 48 y 44 metros, para los años 2016 y 2018, respectivamente. Los ADCPs realizaron mediciones en intervalos de un metro de profundidad, capturando datos cada 10 minutos, a excepción

del ADCP en BC durante el período de 2016, que registró mediciones cada 15 minutos (tabla 2.1).

Tabla 2.1: Especificaciones de los datos de corrientes disponibles. * Los datos de BC para el periodo del 20 de septiembre al 25 de septiembre de 2016 no se encuentran disponibles debido a un error en el instrumento encargado de la toma de datos.

Campaña	Ubicación	Periodo de muestreo	Frecuencia	Profundidad
2016	BC	7 - Sep a 30 - Sep *	15 min	4-23 metros
	PD	14 - Jun a 30 - Sep	10 min	5-46 metros
2018	BC	3 - May a 13 - Jul	10 min	3-19 metros
	PD	3 - May a 20 - Jul	10 min	5-41 metros

Se realizó un control de calidad de los datos, considerando el porcentaje de datos erróneos, la correlación entre los datos obtenidos por los transductores del ADCP y la orientación del ADCP. Durante este control se observó que los datos de BC para el periodo 20 septiembre a 25 de septiembre de 2016 presentaron errores altos, por lo que no se utilizaron para este estudio. Posterior a esto los datos de corriente fueron promediados horariamente. Estas series de tiempo fueron referenciadas al norte geográfico, usando la declinación magnética de cada ubicación (BC: 6.23° y PD: 6.11°).

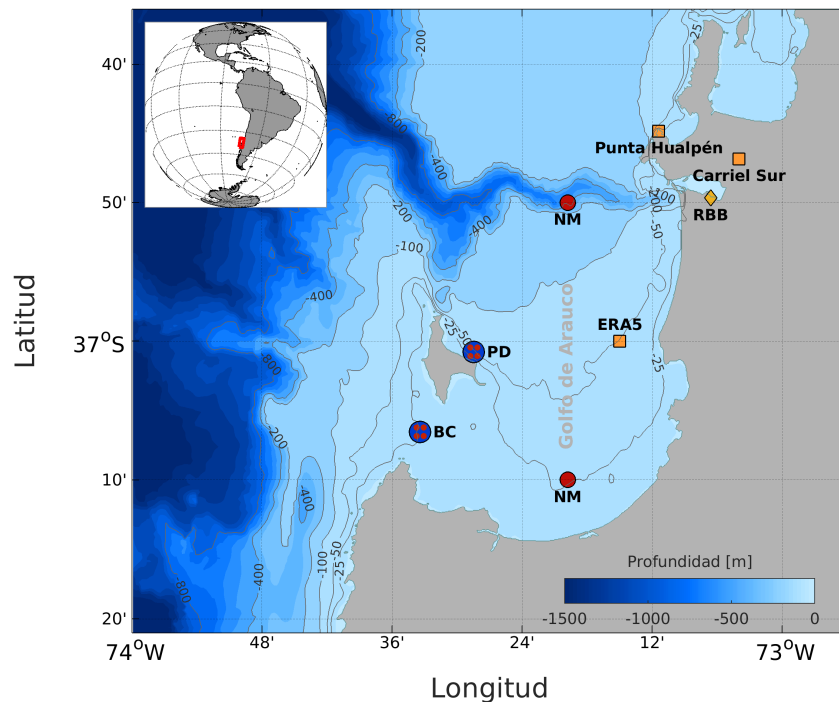


Figura 2.3: Ubicación geográfica de los datos estudiados. Las ubicaciones de los ADCPs se presentan en azul con círculos rojos. Los cuadrados naranjos indican la ubicación de las estaciones meteorológicas y del punto de viento de ERA5. En círculos rojos se observan los dos puntos de la grilla de datos de nivel del mar utilizados en este trabajo.

2.2.2. Datos nivel del mar

Con el objetivo de determinar las diferencias en la altura del nivel del mar a lo largo del golfo se utilizaron dos series de nivel del mar provenientes del reanálisis GLORYS12V1. Las ubicaciones de los puntos escogidos se observan en la figura 2.3, los que corresponden al punto más cercano a la cabecera del golfo y a la boca grande.

El reanálisis GLORYS12V1 es generado por el servicio de vigilancia Marina de Copernicus (CMEMS) e incluye promedios diarios y mensuales de temperatura, salinidad, corrientes, nivel del mar, profundidad de la capa de mezcla y datos de hielo sobre el océano global (Lellouche et al., 2018). Está basado en el actual sistema de pronóstico global de tiempo real de CMEMS, el cual utiliza NEMO para las simulaciones oceánicas. Las simulaciones están forzadas superficialmente por ECMWF ERA-Interim (período 1993-2018) y posteriormente por ERA5 (2018-2020). Las observaciones son asimiladas utilizando datos satelitales de anomalía del nivel del mar y temperatura superficial del mar, además de datos in situ de concentración de hielo y temperatura y salinidad. Posee una resolución horizontal de $1/12^{\circ}$ y 50 niveles verticales.

2.2.3. Datos de caudal del río Biobío

Para observar si el aporte de agua dulce proveniente desde el río Biobío genera algún impacto sobre las corrientes estudiadas se usaron datos de caudal medidos en la desembocadura (Dirección General de Aguas: DGA, www.dga.cl) para los periodos invernales de 2016 y 2018. Durante estos periodos, que coinciden con la disponibilidad de los datos de corriente, únicamente se observaron valores faltantes para el período comprendido entre el 27 de julio y el 3 de agosto de 2016.

2.2.4. Obtención y análisis de las corrientes submareales

Debido a que en los lugares de medición, la mayoría de la varianza se encuentra concentrada en un solo eje, las corrientes fueron rotadas al eje de máxima varianza (EMV) y el eje ortogonal a este (EOV) para cada periodo siguiendo la metodología de Emery y Thomson (2001). Los EMV se orientaron de tal forma que estos presentan valores positivos hacia la costa y negativos en dirección del océano para ambas ubicaciones (figura 3.5). Se realizaron análisis armónicos al nivel del mar y a las corrientes para analizar los principales constituyentes de las corrientes de marea (T_TIDE: Pawlowicz et al., 2002). Para determinar el régimen de marea en la región se obtuvo el factor de forma F ($F = (K1 + O1)/(M2 + S2)$) a partir de los constituyentes mareales. Estas corrientes fueron

luego retiradas para obtener corrientes submareales. Siguiendo la metodología de [Emery y Thomson \(2001\)](#) se les aplicó un filtro coseno-Lanczos de 30 horas a las corrientes submareales para eliminar todas aquellas altas frecuencias que no son de nuestro interés en este trabajo. Para determinar las frecuencias más energéticas en las series de corrientes submareales se calcularon espectros de frecuencia de las corrientes a distintas profundidades siguiendo la metodología presentada en [Emery y Thomson \(2001\)](#).

Con el objetivo de establecer una relación entre las corrientes submareales mencionadas previamente y el viento norte relacionado con el paso de ciclones extratropicales, se calcularon los modos de variabilidad dominantes presentes en las corrientes por medio de análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF, [Halldor y Venegas, 1997](#)). Las EOF son una herramienta que permite repartir la varianza de un conjunto de series de tiempo distribuidas espacialmente en modos de variabilidad independientes (ortogonales) entre sí. Cada uno de estos modos está asociado a una serie de tiempo o componente principal (PC) y a un patrón espacial (EOF). Las EOF están definidas de la siguiente forma

$$F(x, y, t) = \sum_{m=1}^N E_m(x, y) \times A_m(t)$$

Donde,

- $F(x, y, t)$ es la serie de tiempo original en función del tiempo y del espacio
- $E_m(x, y)$ muestra las estructuras espaciales de las componentes principales que representan la variación temporal de F
- $A_m(t)$ es la componente principal que indica cómo la amplitud de cada EOF varía con el tiempo.

Estos componentes principales fueron sometidos a una comparación con los datos de viento meridional de Punta Hualpén mediante dos enfoques distintos. En primer lugar, se empleó el análisis de correlación cruzada ([Emery y Thomson, 2001](#)). Esta metodología permite cuantificar el grado de relación entre dos señales en el dominio del tiempo. Posteriormente, se utilizó el análisis ondeletas de coherencia, el cual permite examinar las relaciones entre dos series en el dominio de la frecuencia y el tiempo ([Grinsted et al., 2004](#)). Este método, ampliamente usado en el análisis de series temporales geofísicas, posibilita la exploración de relaciones de fase y coherencia entre dos conjuntos de datos en el espacio tiempo-frecuencia. Para llevar a cabo este análisis se hizo uso del toolbox “A

cross wavelet and wavelet coherence toolbox for MATLAB” el cual fue creado por Aslak Grinsted y colaboradores (Grinsted et al., 2004). Como resultado se obtiene una representación visual que resalta las regiones en las cuales las dos series de datos presentan una relación significativa en términos de coherencia y fase.

Por último, para obtener la respuesta promedio de las corrientes al viento asociado al paso de ciclones extratropicales, se utilizó el análisis de compuestos. A partir de esto, se generó un promedio del viento y corrientes de todos los eventos donde el paso de un ciclón extratropical sobre la zona forzó un viento norte superior a 5 m/s. El centro de cada evento (t_0) se determinó como el período de máxima intensidad del viento norte en las 48 horas siguientes a la aparición de un ciclón extratropical en la zona (figura 2.2). A partir de este periodo se generaron promedios entre las 48 horas previas (t_{0-48}) y las 48 horas posteriores (t_{0+48}) a este periodo.



CAPÍTULO 3

Resultados

3.1. Comparación ERA5 con datos locales

Los datos atmosféricos locales y las series de tiempo seleccionadas de ERA5 mostraron gran similitud tanto en la presión a nivel del mar como en las componentes del viento. La tabla 3.1 muestra una comparación estadística de ambas ubicaciones para todo el período de estudio y separadas en las distintas estaciones del año. Se observa que los coeficientes de correlación de Pearson (R) obtenidos para la presión son consistentemente superiores a 0.97 en las dos ubicaciones estudiadas y en todas las estaciones del año. Estos resultados sugieren que los datos de presión en el resto de la región son lo suficientemente confiables para su uso en la determinación del paso de ciclones extratropicales en la zona.

Tabla 3.1: Análisis estadístico comparativo entre los datos de ERA5 y las observaciones de presión a nivel del mar, viento zonal y meridional anuales y separadas por estación del año. PH: Punta Hualpén y CS: Carriel Sur

	Presión a nivel del mar			Viento Zonal			Viento Meridional		
	R	BIAS	RMSE	R	BIAS	RMSE	R	BIAS	RMSE
CS Total	0.98	0.53	0.98	0.64	0.25	2.05	0.86	-0.18	1.99
CS Otoño	0.98	0.55	0.95	0.59	0.2	1.92	0.86	-0.24	1.89
CS Invierno	0.99	0.31	0.89	0.63	-0.02	1.79	0.88	-0.16	1.99
CS Primavera	0.98	0.5	0.97	0.62	0.36	2.12	0.86	-0.1	1.89
CS Verano	0.96	0.77	1.11	0.56	0.49	2.35	0.8	-0.22	2.19
PH Total	0.99	-0.99	1.13	0.81	-0.96	1.74	0.89	-0.34	2.5
PH Otoño	0.98	-0.84	1.05	0.82	-0.93	1.57	0.89	-0.52	2.27
PH Invierno	0.99	-1.06	1.17	0.8	-0.61	1.68	0.9	-0.75	2.46
PH Primavera	0.99	-1.1	1.19	0.81	-0.84	1.58	0.91	0.01	2.32
PH Verano	0.97	-0.91	1.1	0.69	-1.5	2.09	0.8	-0.07	2.9

En el caso del viento, las correlaciones fueron de 0.64 y 0.86 para la componente zonal y meridional en Carriel Sur, mientras que en Punta Hualpén estos valores fueron de 0.81 y 0.89, respectivamente. Al comparar los datos de las correlaciones entre las estaciones del año, se observó que ERA5 es mejor reproduciendo las condiciones atmosféricas durante invierno que durante verano. Al considerar la comparación con Carriel Sur, este período

presenta el menor sesgo (BIAS) y raíz del error cuadrático medio (RMSE) para la presión y el viento zonal. En el caso del viento meridional el menor sesgo se encuentra en los meses de primavera, sin embargo las magnitudes se mantienen dentro del mismo orden a lo largo de todos los periodos estudiados. Los resultados negativos de los sesgos indican que, en promedio, los valores de ERA5 se encuentran por encima de los valores observados en Carriel Sur y Punta Hualpén. Esto puede significar una sobreestimación en la magnitud del viento sur, o una subestimación en la magnitud del viento norte. Al observar los diagramas de dispersión de la figura 3.1, se evidencia que los datos de ERA5 subestiman la magnitud de la componente meridional del viento, justificando los valores de BIAS presentados en la tabla 3.1. Esto se puede observar al analizar los casos de vientos norte intensos, donde los registros de ERA5 muestran magnitudes inferiores a 15-16 m/s. En contraste, las observaciones en Carriel Sur y Punta Hualpén registran magnitudes superiores a 20 m/s (figuras 3.1b y 3.1e).

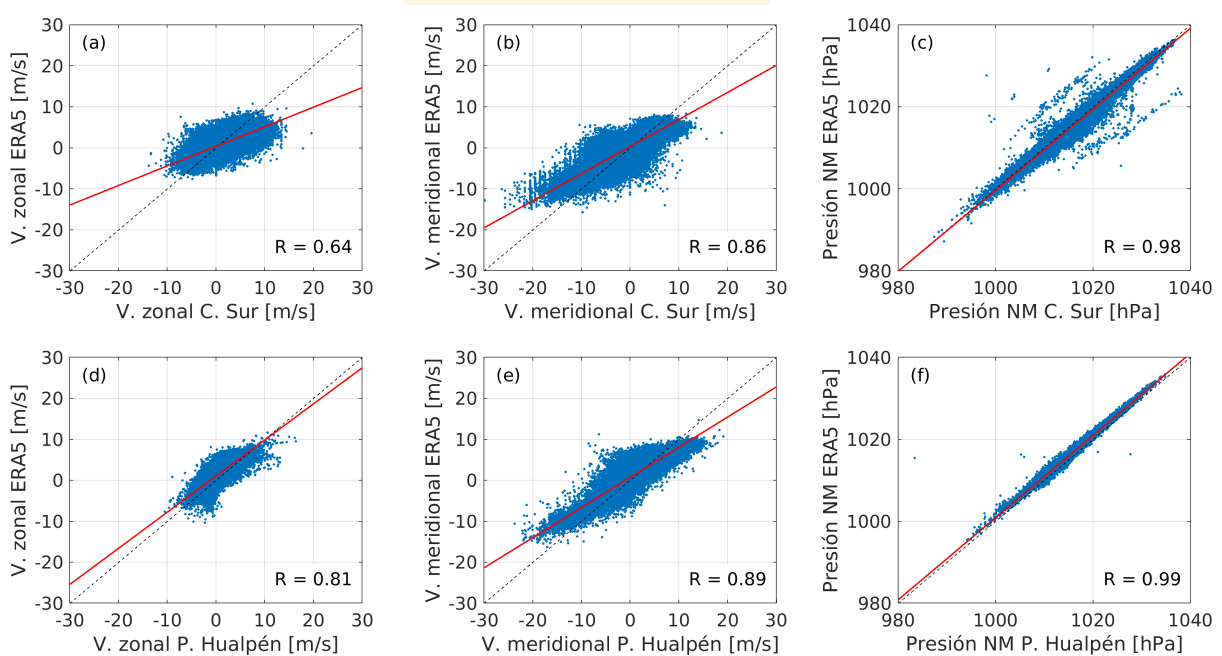


Figura 3.1: Diagrama de dispersión de los datos de viento zonal, meridional y presión a nivel del mar entre ERA5 y los observados en Carriel Sur (paneles superiores) y Punta Hualpén (paneles inferiores). En la esquina inferior se muestra el respectivo coeficiente de correlación de Pearson (R).

3.2. Caracterización de los ciclones extratropicales

A partir de los criterios definidos en la sección 2.1.2, se detectó el paso de 1599 ciclones extratropicales sobre la región de estudio (30°-50°S) entre los años 1979 y 2020. De este

total, 1182 ciclones (74%) se mantuvieron al interior de la zona menos de dos días y solo 10 eventos (<1%) superaron los 5 días (Figura 3.2a). En promedio se detectaron 38 ± 6.7 ciclones al año. La mayor concentración de ciclones se encontró durante los meses de invierno austral (mayo-agosto) con una frecuencia promedio de 5.3 ciclones al mes, mientras que el resto del año (septiembre-abril) la frecuencia promedio fue de 2 ciclones al mes (Figura 3.2b). La tendencia de los últimos 40 años es negativa con un valor de -0.1 ciclones al año. Por otra parte, se observa una alta variabilidad en la serie de tiempo, con valores máximos el año 1997 y 2002 y mínimos durante 1998. (Figura 3.2c).

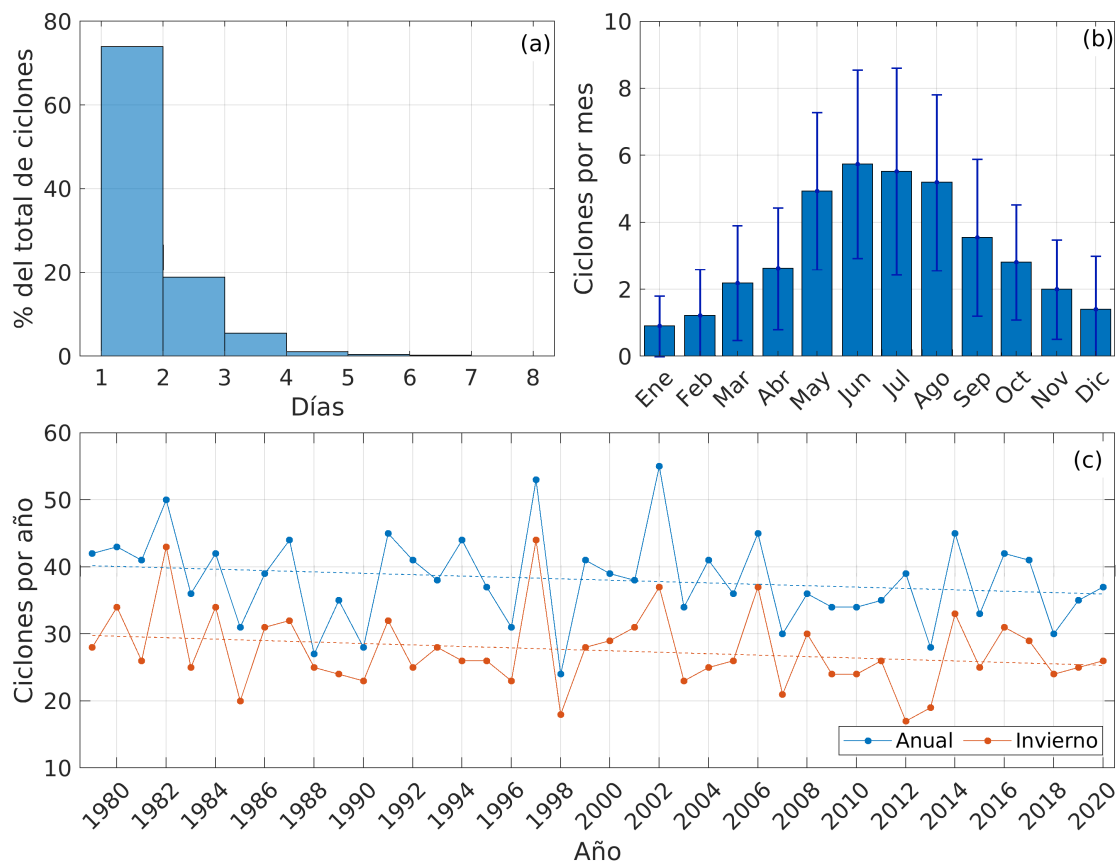


Figura 3.2: (a) Distribución de la duración de los ciclones identificados al interior de la región de estudio. (b) Promedio mensual y desviación estándar de ciclones presentes en el área de estudio para el periodo 1979-2020. (c) Total de ciclones detectados al año (azul) y durante los meses de invierno (rojo) de cada año. La tendencia lineal de cada serie está indicada por las líneas segmentadas

El viento meridional de ERA5 presentó una dirección desde el norte en el $\sim 75\%$ de los casos en los que se detectó un ciclón extratropical en la región de estudio (figura 3.3). El otro $\sim 25\%$ de la distribución del viento consiste en vientos desde el sur de baja intensidad, los cuales se concentran principalmente en valores cercanos a cero. El valor máximo de estos vientos no supera los 7 m/s.

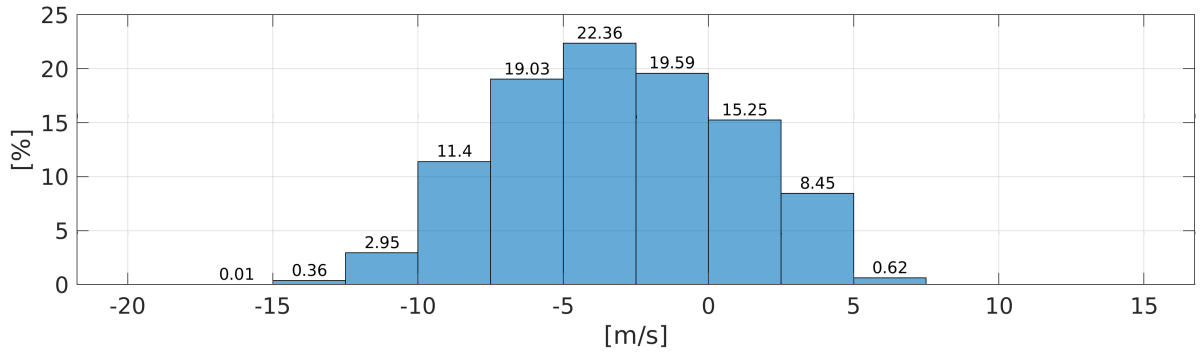


Figura 3.3: Componente meridional del viento (ERA5) durante la presencia de ciclones sobre la región de estudio. Los valores positivos indican viento desde el sur, mientras que los valores negativos indican viento desde el norte.

Para determinar la relación entre los días de viento norte intenso y la presencia de un ciclón extratropical en la zona se definieron días de viento norte intenso (DVNI). Los DVNI corresponden a todos aquellos días que presentan viento desde el norte con magnitudes superiores al percentil 5 del viento norte total (Figura 3.4a). Utilizando este criterio se obtuvo un total de 565 DVNI para el período 1979-2020. De este total, 447 días coinciden con la presencia de un ciclón en la región de estudio, lo que representa el 79% del total de DVNI (Figura 3.4b).

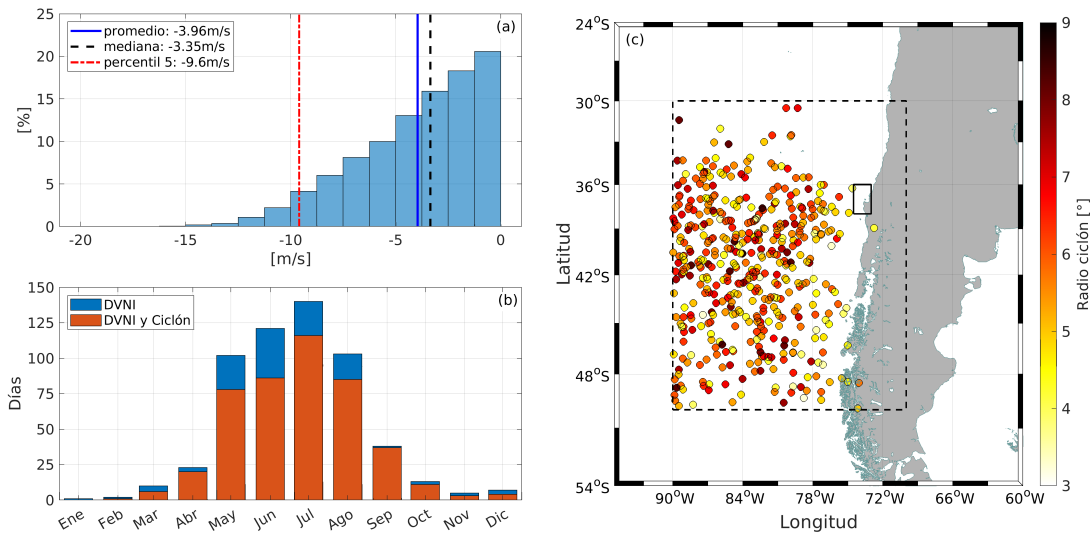


Figura 3.4: (a) Distribución del viento meridional desde el norte, junto al percentil 5, promedio y mediana. (b) Número de DVNI por mes en azul y DVNI en paralelo a la presencia de un ciclón extratropical en naranja. (c) Posición del centro de los ciclones extratropicales presentes durante DVNI. La barra de colores indica el radio estimado del ciclón. DVNI: Día de viento norte intenso.

Estos ciclones se distribuyen a lo largo de la región de estudio, sin embargo la posición de sus centros presentan mayores concentraciones entre los 35° y los 45°S (Figura 3.4c).

La banda costera a lo largo de la región de estudio presenta una baja densidad de ciclones durante los DVNI, en contraste a las regiones más oceánicas que poseen una mayor concentración. Los ciclones cuyos centros se posicionan sobre el continente son en su mayoría al sur de 45°S y presentan radios inferiores a los 6° (~650 km) (Figura 3.4c).

3.3. Circulación invernal del golfo de Arauco

3.3.1. Corrientes medias y ejes de máxima varianza

La corriente total concentró gran parte de la varianza en ejes similares durante los dos inviernos analizados. En Boca Chica (BC), las corrientes exhibieron orientaciones promedio de 103.2° y 97.2° con respecto al norte para los periodos de 2016 y 2018, respectivamente. Por otro lado, en Punta Delicada (PD), las orientaciones promedio registradas fueron de 134.9° y 144.2° para los mismos periodos (figura 3.5a). La orientación de estos EMV se mantuvo notablemente constante a lo largo de la columna de agua. Este patrón de estabilidad fue particularmente evidente en las mediciones realizadas en BC, donde las fluctuaciones direccionales en la columna se mantuvieron por debajo de los 15° en ambos periodos evaluados (figura 3.5b). En el caso de PD, la dirección del EMV osciló entre los ~125° y ~150° para el periodo 2016 y entre ~140° y ~150° para el 2018. Estos EMV explicaron sobre el 70 % de la varianza total de las corrientes en toda la columna de agua, alcanzando hasta el 90 % en profundidades medias en todos los casos estudiados (figura 3.5c).

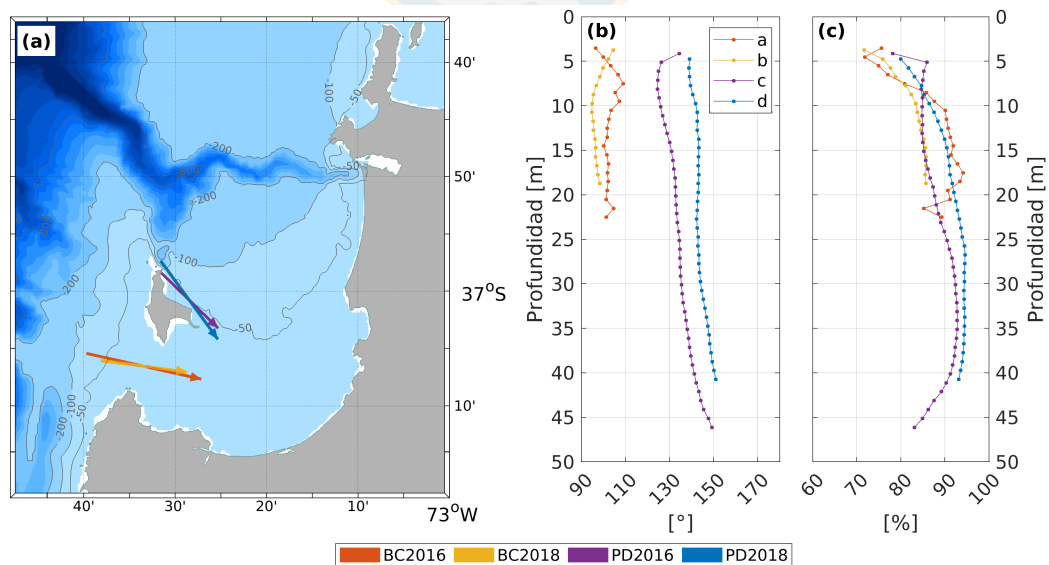


Figura 3.5: (a) Dirección promedio del eje de máxima varianza (EMV) para cada periodo de estudio. La flecha indica la dirección positiva del EMV. Profundidad versus (b) Inclinación en grados del EMV con respecto al norte, (c) porcentaje de varianza explicado por el EMV.

Las corrientes medias a lo largo del EMV y su eje ortogonal (EOV) se observan en la figura 3.6. Durante ambos periodos la estructura vertical media se mantuvo similar en cada ubicación. La estructura vertical de BC a lo largo del EMV (figura 3.6a-b) presentó una marcada dirección negativa (hacia fuera del golfo) a lo largo de toda la columna de agua con intensas corrientes en la superficie que disminuyen con la profundidad. Durante 2016, (figura 3.6a) la magnitud máxima del flujo medio fue de 12.7 cm/s a los 5 metros y la mínima fue de 2.7 cm/s en el fondo. Durante 2018 (figura 3.6b), la magnitud de las corrientes disminuyeron con la profundidad, desde 9.1 cm/s en superficie hasta los 3.8 cm/s, en el fondo. Por el contrario, la corriente promedio en el eje ortogonal (aproximadamente en dirección norte-sur) presentó magnitudes muy bajas en ambos periodos, las cuales oscilan entre los 2 y 0 cm/s. En ambos casos las corrientes a lo largo del EMV mostraron una amplia desviación estándar, lo que sugiere gran variabilidad en su dirección en contraste a las corrientes del EOV. A diferencia de BC, las corrientes en Punta Delicada (PD) exhiben un patrón promedio de doble capa. Este comportamiento se caracteriza por un cambio de dirección entre los 25 y 35 metros de profundidad (figura 3.6c-d). Sobre los 25-35 metros las corrientes promedio en ambos periodos se dirigen hacia el interior del golfo (positivo) con valores máximos de 4 cm/s en 2016 y 2 cm/s en 2018, mientras que las corrientes por debajo presentaron menor intensidad y una dirección hacia el océano (negativo). El flujo medio en la componente ortogonal al EMV presentó baja intensidad con valores que no superan 1 cm/s.

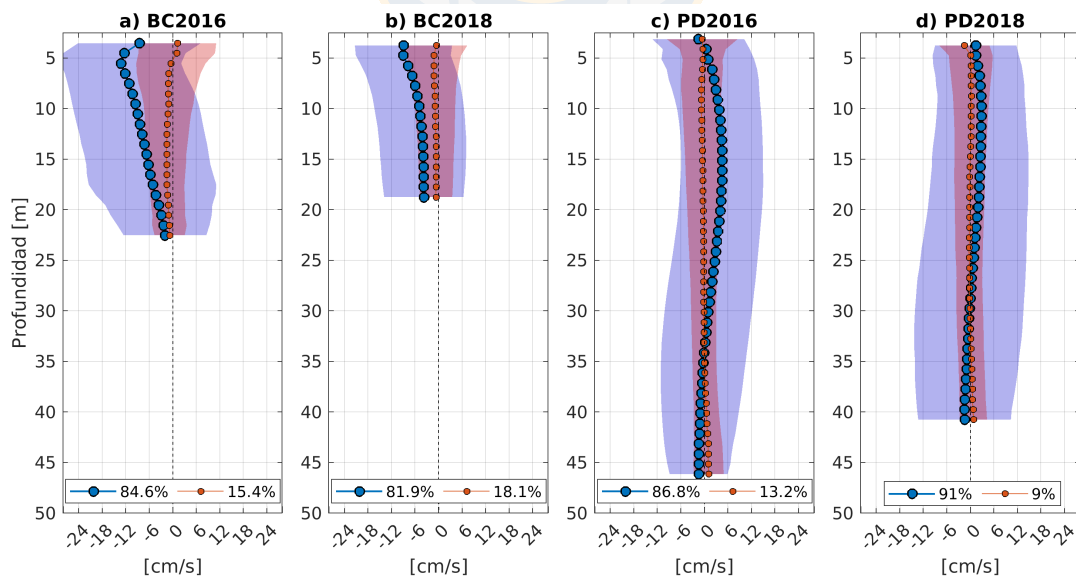


Figura 3.6: Estructura vertical promedio de la corriente total a lo largo del EMV (azul) y del EOV (rojo). En sombras se indica la desviación estándar. Los porcentajes corresponden a la varianza total contenida en cada eje.

3.3.2. Análisis mareal de las corrientes

La figura 3.7a muestra el porcentaje de varianza explicado por las mareas en cada anclaje. En el caso de BC, las corrientes mareales explican entre el 26% y 35% de la varianza total de las corrientes durante 2016 y entre el 20% y el 26% para el periodo 2018. En los anclajes de PD, el porcentaje de la varianza explicada por las corrientes de marea es menor a 8.1% durante 2016 y oscila entre el 8 y el 19% para 2018, con un aumento hacia mayores profundidades (figura 3.7a). El análisis espectral del nivel de mar registrado por los anclajes de BC y PD se observan en los paneles b y c respectivamente. Estos muestran máximos significativos en las frecuencias diurnas (O1, K1) y semidiurnas (M2, S2). El factor de forma obtenido a partir del nivel del mar para los cuatro anclajes oscila entre 0.42 y 0.53 lo que indica que en la zona se presenta un régimen mareal mixto con predominancia en las mareas semidiurnas (figura 3.7b-c).

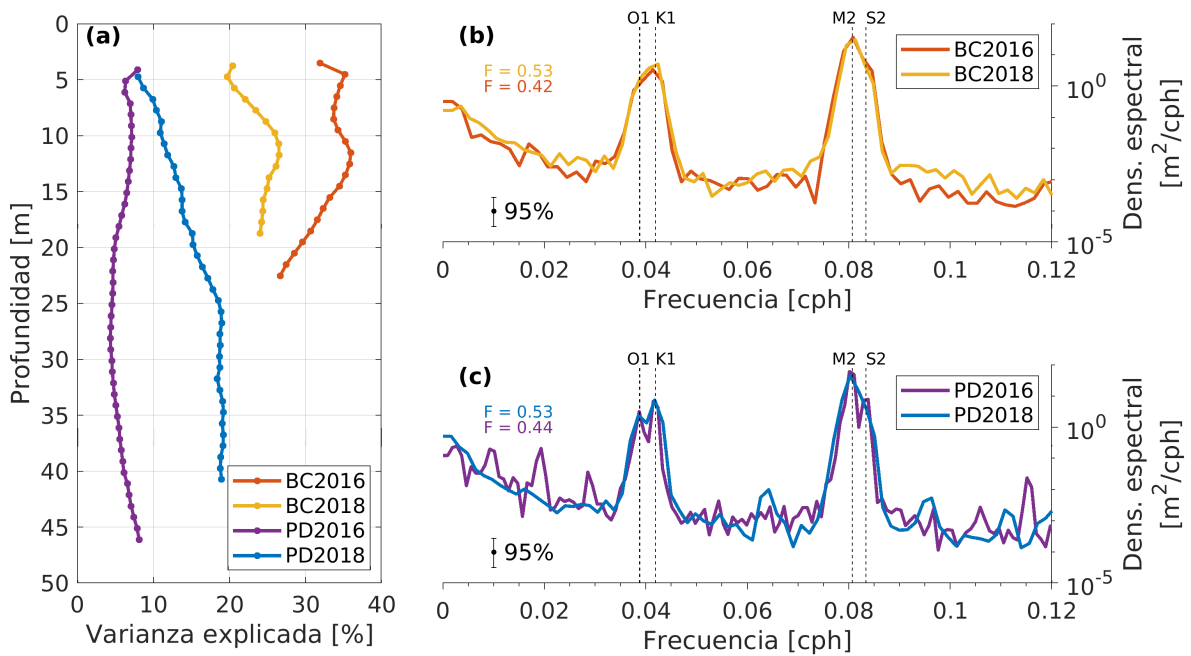


Figura 3.7: (a) Estructura vertical del porcentaje de varianza de la corriente total explicado por la corriente de marea. Autoespectro del nivel del mar en (b) BC y (c) PD durante el periodo 2016 y 2018. Las líneas negras entrecortadas indican la frecuencia (cph) de las principales componentes mareales con las cuales se calculó el parámetro de forma F .

3.3.3. Espectros de frecuencia de la corriente submareal

Al sustraer todas las constituyentes mareales significativas de la corriente total, se obtiene la componente submareal. Para explorar las frecuencias de variabilidad presentes en

estas corrientes submareales, se generaron espectros de frecuencia para todas las profundidades. Es importante destacar que estos análisis se realizaron posterior a la aplicación del filtro coseno-Lanczos de 30 horas, por lo que este análisis se enfoca en las frecuencias asociadas a periodos mayores a 30 horas. La figura 3.8 muestra estos espectros separados en el EMV presentado en la figura 3.5 y EOV. Los cuatro anclajes analizados concentraron la mayor parte de la energía en la banda de frecuencias sinóptica (2-16 días).

El anclaje ubicado en BC durante 2016, mostró máximos de energía en el EMV entre 0.29 y 0.37 ciclos por día (cpd) a lo largo de toda la columna de agua (figura 3.8a), lo que corresponde a un periodo cercano a los 3 días. El EOV (figura 3.8b) presentó leves máximos de energía sobre los 10 metros de profundidad alrededor de las frecuencias sinópticas (0.2 a 0.4 cpd). Se observó un máximo en las frecuencias más bajas, sin embargo, el periodo de observación en este año se limitó a 13 días consecutivos, por lo que la frecuencia máxima estudiada con este enfoque es de 0.15 cpd (6.5 días). En contraste, durante el 2018, donde la serie estudiada es de 70 días de largo, los máximos en el EMV (figura 3.8c) se presentaron a los 0.19 cpd (5 días) y a los 0.11 cpd (9 días). En ambos casos la energía se concentró bajo los 7 metros de profundidad. Similarmente el EOV (figura 3.8d) presentó un máximo en 0.19 cpd (5 días).

En el anclaje PD durante el año 2016 (figura 3.8e), se identificaron altos niveles de energía centrados en los 0.28 cpd (3.5 días) a lo largo de la columna de agua, sin embargo los valores significativos solo se presentaron en superficie y a profundidades bajo los 25 metros. La banda entre los 12-16 días albergó la mayor energía de este anclaje, con un máximo sobre los 25 metros centrado en 0.06 cpd (16 días) y otro centrado en 0.084 cpd (12 días) bajo esta profundidad. Adicionalmente se identificó un máximo de energía en 0.167 cpd (6 días) por debajo de los 25 metros. En el eje de mínima varianza (figura 3.8f), la energía se distribuyó a lo largo de varias frecuencias dentro de la banda sinóptica, pero se concentró predominantemente en la superficie, específicamente por encima de los 5 metros de profundidad. Similarmente, durante el año 2018 la componente a lo largo del EMV (figura 3.8g) registró máximos de energía bajo los 20 metros a los 0.18 cpd (5.5 días) y bajo los 15 metros entre 0.103 cpd (9.7 días) y 0.076 cpd (13 días). Cerca de la superficie solo se detectó un máximo en 0.13 cpd (7.5 días). Además, se identificaron máximos de energía en las frecuencias menores a 0.025 cpd (40 días) a lo largo de toda la columna de agua, sin embargo estos resultados son poco precisos considerando que la serie sólo dura 78 días. En el eje ortogonal (figura 3.8h) se observó energía desde la superficie hasta los 15 metros también a los 0.103 cpd (9.7 días), sin embargo es significativamente más baja que lo observado en el EMV.

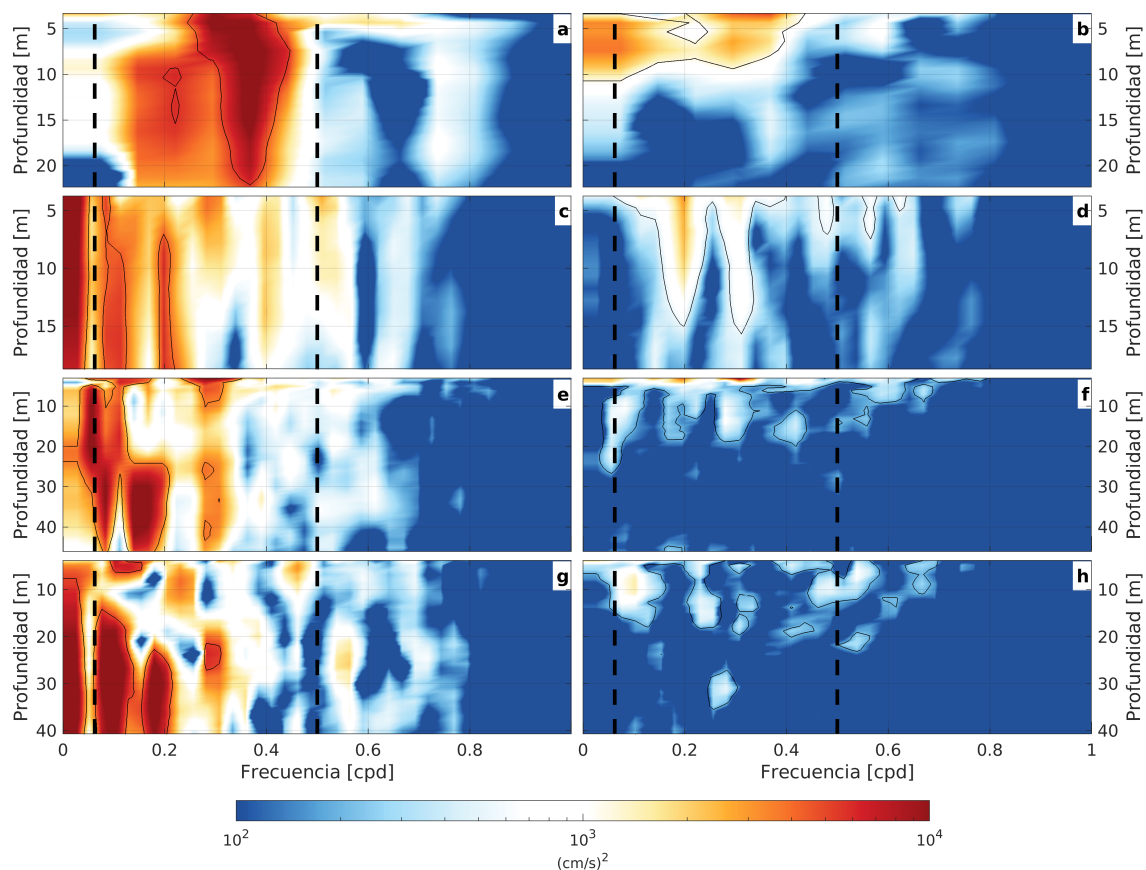


Figura 3.8: Espectros de frecuencia de las corrientes rotadas al EMV (paneles izquierdos) y EOV (paneles derechos) registrada por el anclaje (a-b)BC2016, (c-d)BC2018, (e-f)PD2016 y (g-h)PD2018. Las líneas segmentadas negras encierran la banda de frecuencia sinóptica (2-16 días).

3.4. Respuesta del golfo de Arauco al paso de ciclones extratropicales

En esta sección se analizaron los eventos determinados por el algoritmo de reconocimiento de ciclones, en conjunto con las observaciones de corrientes al interior del golfo. Estas se encuentran separadas por meses para un mejor análisis de los eventos. Dependiendo de la disponibilidad de los datos de ADCP (tabla 2.1), algunos meses muestran observaciones en PD y BC y otros solo en PD. Cabe destacar que las corrientes analizadas se encuentran descompuestas en el eje de máxima varianza (EMV) presentado en la figura 3.5 y su componente ortogonal (EOV). Sin embargo, dado que las corrientes a lo largo del EOV en PD muestran poca variabilidad y magnitud, estas no fueron analizadas.

3.4.1. Campaña 2016

Junio 2016

Durante el mes de junio de 2016, se registró un solo evento de paso de ciclón sobre la zona entre los días 21 y 22 (figura 3.9a). La respuesta de la corriente en PD presentó una dirección hacia el interior del golfo desde la superficie hasta los 30 metros. Bajo los 30 metros la dirección es hacia el exterior del golfo. En ambos casos las intensidades fueron cercanas a los 5 cm/s (figura 3.9b). Posterior al reconocimiento de este ciclón sobre la zona se observó que el viento meridional se dirigió al sur con una magnitud máxima de 5.4 m/s. Este cambio en el viento se debe a que el ciclón aún ejerce influencia sobre la zona, aunque su centro se encuentra fuera de la región de estudio, al sur de 50°S. El nivel del mar en la cabecera del golfo alcanzó niveles similares a los observados en boca grande, lo cual indica una acumulación de agua en la región sur del golfo. Sin embargo, posterior al evento, el nivel del mar en la cabecera disminuyó mucho más rápido que las anomalías observadas en boca grande (figura 3.9c). El caudal no presentó variaciones a lo largo de todo el periodo.

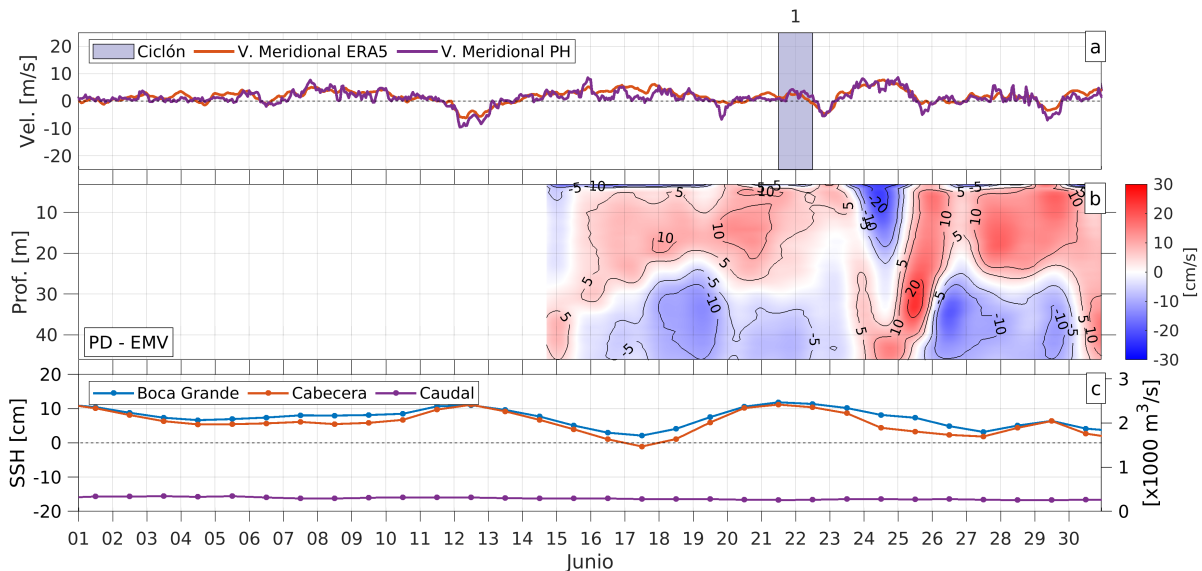


Figura 3.9: (a) Serie de tiempo del mes de junio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).

Julio 2016

En el mes de julio se detectaron siete eventos (figura 3.10a). De estos, los eventos 1, 2, 4, 5 y 7 exhibieron una estructura similar, caracterizada por una corriente dirigida al interior del golfo por la superficie y una salida desde el fondo cuando el viento norte alcanza su mayor intensidad. Aunque hubo variaciones en la magnitud y la profundidad del cambio de dirección, estos eventos mostraron un comportamiento similar en términos de patrón de corrientes. En contraste, los eventos 3 y 6 presentaron corrientes dirigidas hacia el interior del golfo a lo largo de toda la columna de agua (figura 3.10b). Durante los eventos, la anomalía del nivel del mar en la cabecera superó el de boca grande y solo se mantuvo más bajo entre el 1 y 8 y entre el 25 y 28 de julio, periodos que coinciden con la ausencia de ciclones en la región. El caudal del río no presentó variaciones importantes durante los eventos 1 a 5. Presentó un aumento el día 24, sin embargo los datos posteriores al día 26 no se encuentran disponibles (figura 3.10c).

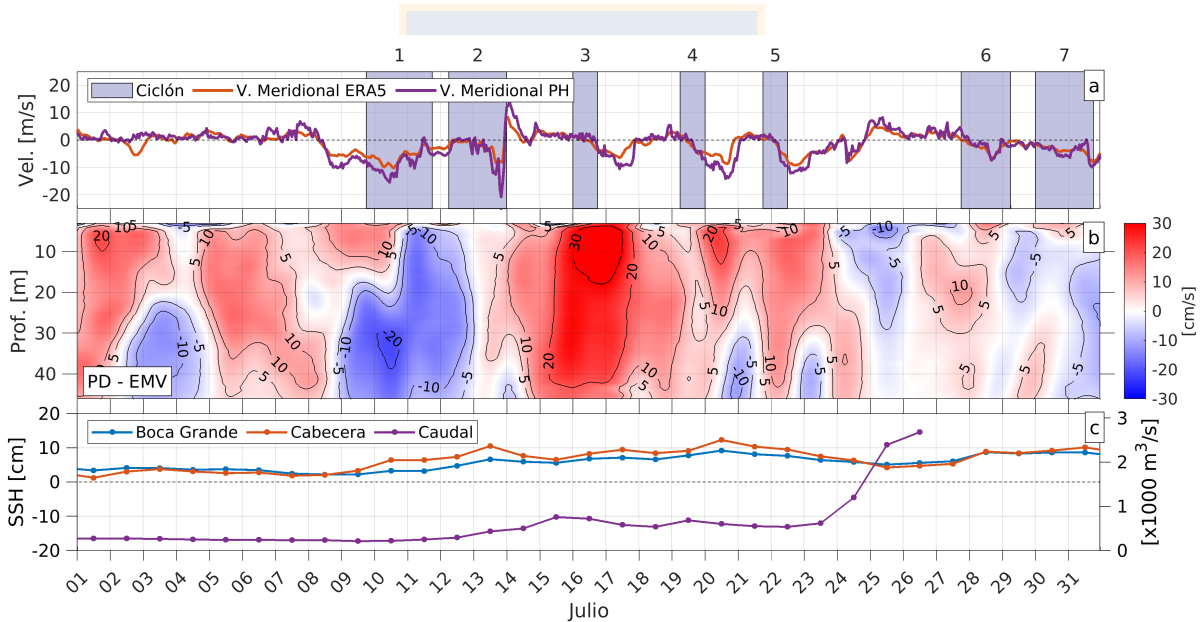


Figura 3.10: (a) Serie de tiempo del mes de julio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).

Agosto 2016

Durante el mes de agosto de la campaña 2016 se detectaron ocho ciclones extratropicales sobre la zona, sin embargo dos de ellos ocurren de forma conjunta durante el día 17 por lo que se agruparon como un solo evento. Todos los eventos, a excepción del último

(7), presentaron un viento norte superior a 5m/s durante el paso del ciclón extratropical sobre la zona (figura 3.11a). Durante este período, los eventos 1 a 6 presentaron un comportamiento de doble capa, con entrada de agua por la superficie y salida por el fondo. Posterior a los eventos de viento máximo, esta salida de agua se extendió a lo largo de toda la columna de agua (figura 3.11b). La entrada de agua al golfo durante los eventos 3, 4 y 5 se encuentra muy limitada a la superficie, pero se estima que es debido a la cercanía entre los 3 eventos que altera la estructura observada. Durante el evento 7, la corriente presentó una estructura inversa a los otros casos con una salida por superficie al inicio y entrada que se expande a lo largo de la columna de agua con magnitudes cercanas a 5 cm/s. Este cambio en la circulación se atribuye a la falta de viento norte durante su desarrollo (figura 3.11b). La anomalía del nivel del mar en la cabecera supera a la anomalía en boca grande durante los eventos 1, 3, 4, 5 y 6 y presenta valores menores que en boca chica entre los días 18 y 24, coincidiendo con la ausencia de ciclones en la zona (figura 3.11c). El caudal presenta un aumento entre los días 16 y 18 y luego disminuye progresivamente hacia el final del mes (figura 3.11c).

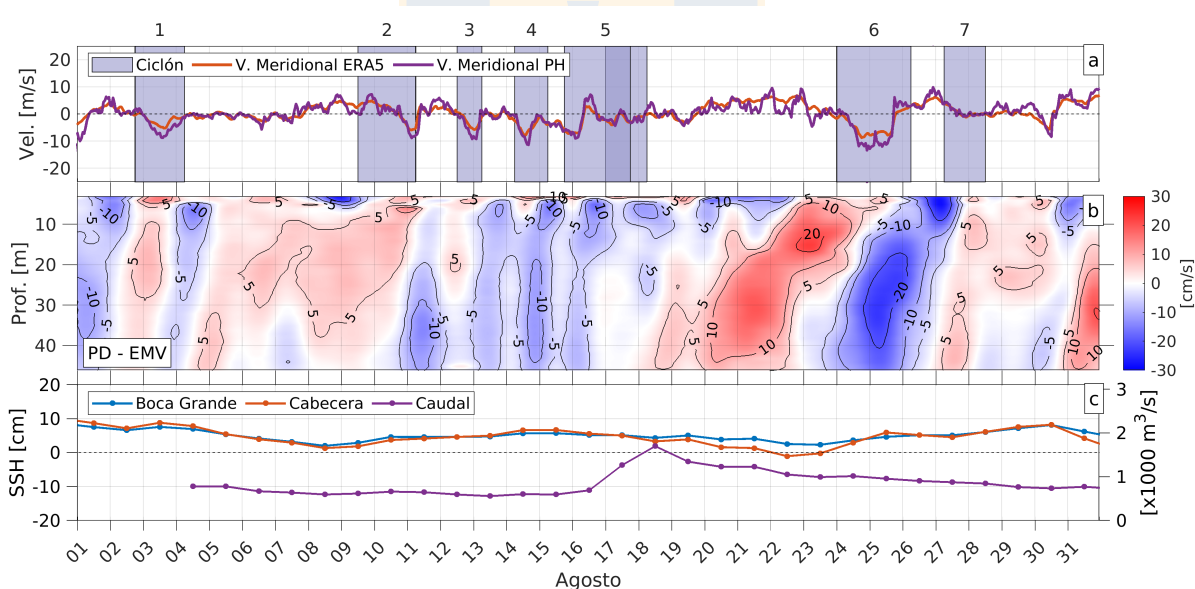


Figura 3.11: (a) Serie de tiempo del mes de agosto para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).

Septiembre 2016

En septiembre se detectaron cuatro eventos de paso de ciclones sobre la zona de estudio, donde solo los eventos 2, 3 y 4 se encuentran asociados a un evento de viento norte (figura 3.12a). Estos eventos exhibieron una estructura similar a la observada en los meses anteriores, caracterizada por una configuración de doble capa en la que la entrada se produce en la capa superior y la salida se lleva a cabo en la capa inferior. En los eventos 2 y 4, donde el viento norte fue más intenso, las corrientes de salida del golfo alcanzan velocidades de 20 cm/s, mientras que para el evento 3 alcanzó magnitudes de 10 cm/s (figura 3.12b). El evento 1, presentó salida de agua bajo los 25 metros de profundidad, sin embargo en superficie las corrientes son cercanas a cero presumiblemente debido a las bajas magnitudes del viento. Durante los cuatro eventos, BC mostró una corriente que se dirige fuera del golfo a lo largo de toda la columna, excepto en el evento 1 donde la corriente negativa solo alcanzó a los 15 m de profundidad. Estas corrientes de salida del golfo alcanzan magnitudes entre 10 y 30 cm/s, siendo las corrientes más intensas de la campaña 2016 (figura 3.12c). Similarmente a los casos anteriores, la anomalía del nivel del mar en la cabecera del golfo aumenta más que lo detectado en boca grande durante el paso de ciclones en la zona, sin embargo en este caso no logra superar el nivel del mar de boca Grande (figura 3.12e). El caudal del río Biobío se mantiene relativamente constante durante todo el período estudiado con caudales entre 350 y 800 m^3/s (figura 3.12e).

3.4.2. Campaña 2018

Mayo 2018

Durante el mes de mayo, se registró un total de 5 ciclones en la zona de estudio, los cuales estuvieron acompañados por vientos provenientes del norte. Sin embargo, solo los últimos 4 eventos coincidieron con datos de corrientes en ambas regiones (figura 3.13a). Entre todos los eventos analizados en esta sección, el evento 2 se destacó por ser el más prolongado, con una duración de 5 días. No obstante, la componente meridional del viento solo presentó valores negativos durante dos días.

Los eventos 3, 4 y 5 también registraron valores negativos para el viento meridional. Las corrientes en PD asociadas a los eventos 2, 3 y 5 presentaron una estructura de doble capa con entrada al golfo en la superficie y salida desde los 10 metros hasta el fondo. Sin embargo, el evento 2 presentó una dirección contraria en la primera mitad del evento. En el caso del evento 4, también se registró una salida de corrientes en el fondo, aunque no se observó una entrada clara en la superficie, ya que las corrientes cercanas a la superficie se mantuvieron cercanas a cero (figura 3.13b).

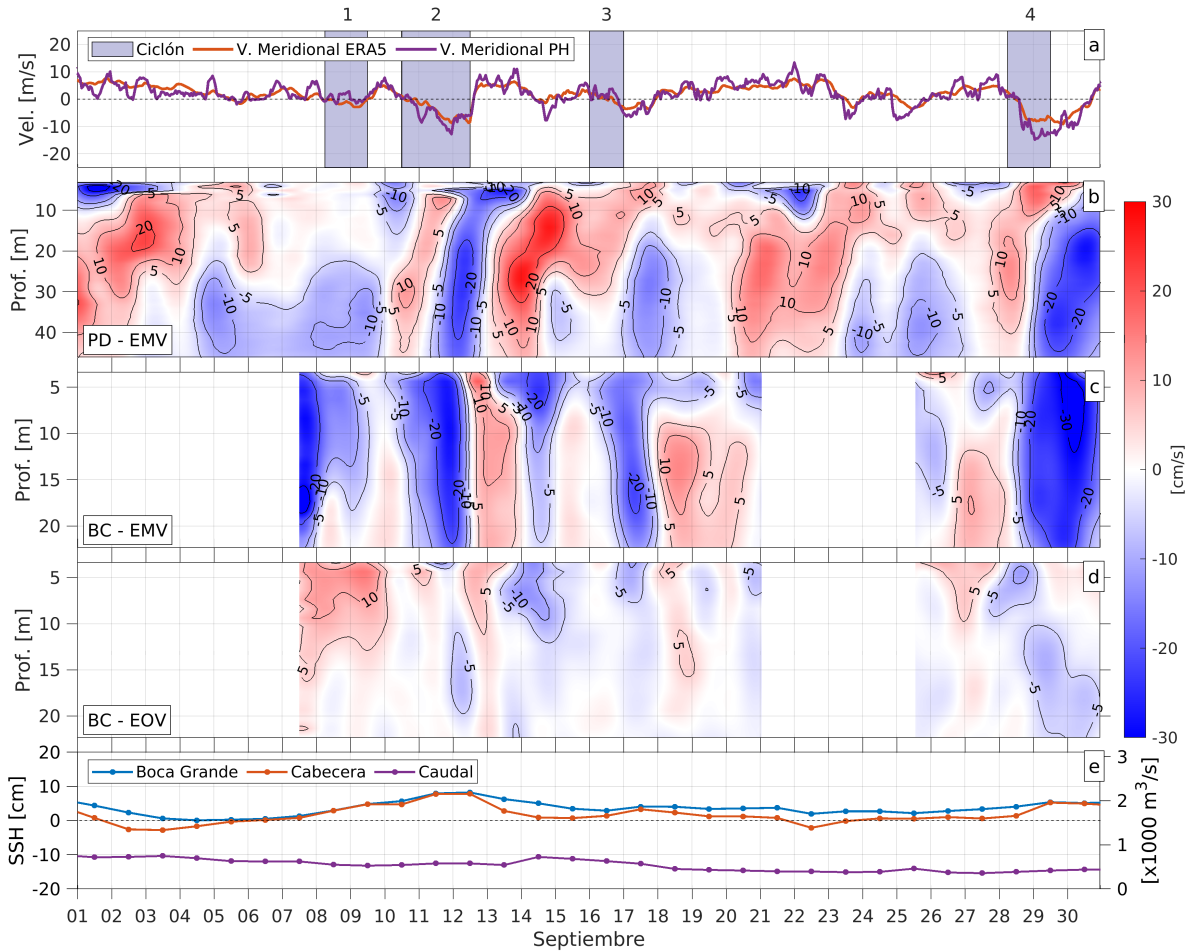


Figura 3.12: (a) Serie de tiempo del mes de septiembre para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).

Por otro lado, las corrientes en el EMV de BC disminuyeron significativamente durante los eventos, alcanzando magnitudes inferiores a los 5 cm/s durante los 4 eventos (figura 3.13c). En contraste, las corrientes en el EOV mostraron una dirección hacia el sur durante los 4 eventos observados, con magnitudes de 5 cm/s llegando a un máximo de 10 cm/s durante el evento 3 (figura 3.13d). La anomalía del nivel del mar en la cabecera del golfo presentó un mayor aumento que en boca Grande durante los 5 eventos analizados, sin embargo solo durante el evento 5 logró superar el nivel del mar observado en boca Grande. El caudal del río Biobío se mantuvo constante a lo largo de todos los eventos, y sólo presentó un aumento el día 30 (figura 3.13e).

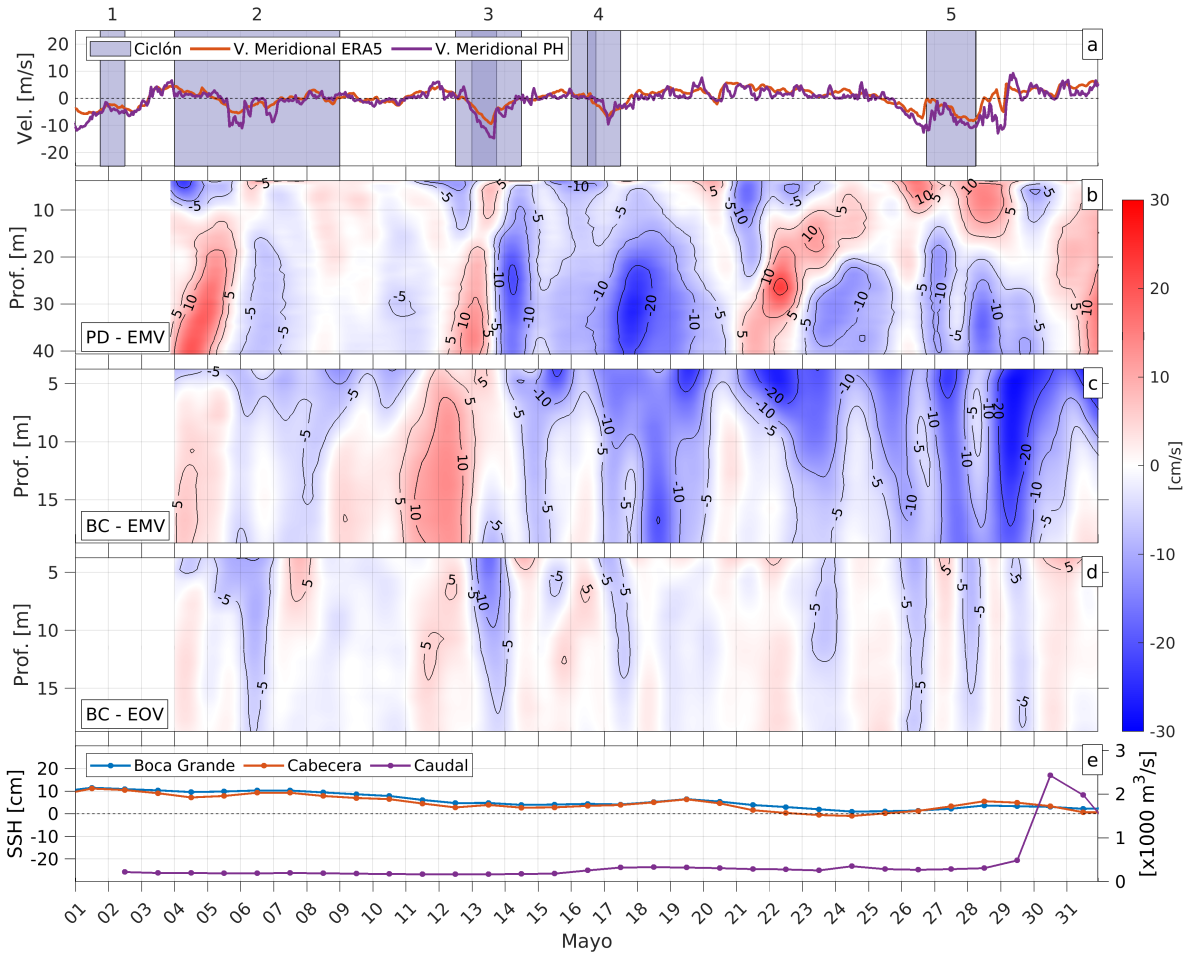


Figura 3.13: (a) Serie de tiempo del mes de mayo para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).

Junio 2018

En el mes de junio, se registró un total de 3 ciclones sobre la región, sin embargo el tercer evento comienza el 30 de junio y termina el 3 de julio por lo que será analizado junto a los eventos de julio. Durante este periodo se volvieron a observar fuertes vientos desde el norte junto al paso de ciclones (figura 3.14a). Similarmente a lo observado en los periodos anteriores, las corrientes en PD mostraron una estructura de doble capa con una capa superficial de entrada y una capa inferior de salida. Posterior al viento máximo, toda la columna de agua presentó un flujo hacia el exterior con magnitudes de 10 cm/s (figura

3.14b).

La corriente en BC presentó una dirección de salida en el EMV con magnitudes entre 5 y 10 cm/s (figura 3.14c), mientras que en el EOV se dirigió hacia el sur, con magnitudes menores a 5 cm/s (figura 3.14d). En ambos eventos, la anomalía del nivel del mar en la cabecera superó a la anomalía en boca Grande, lo que sugiere una acumulación de agua en la cabecera durante estos eventos. Además, el caudal experimentó dos aumentos significativos a lo largo de este mes, coincidiendo con los eventos de paso de ciclón en el área (figura 3.14e).

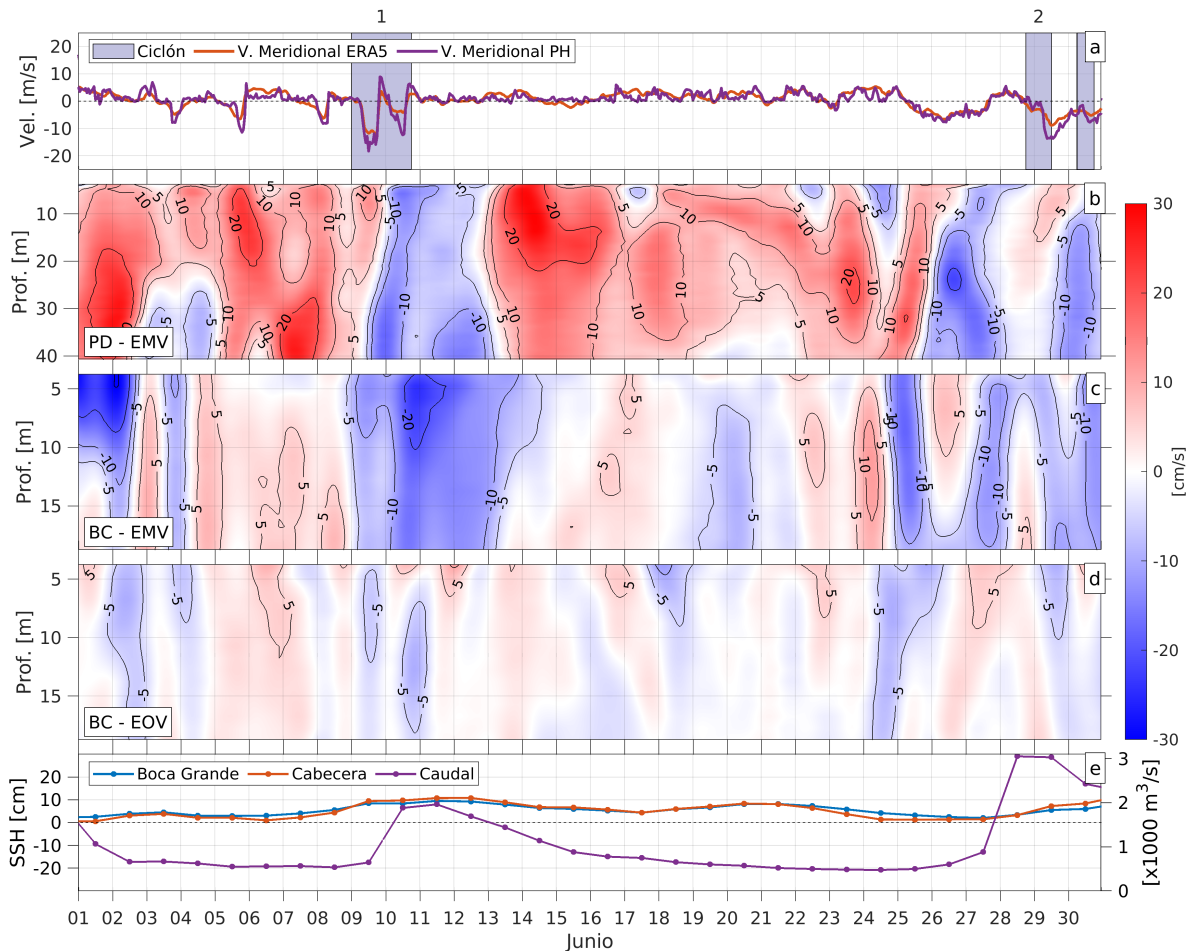


Figura 3.14: (a) Serie de tiempo del mes de junio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).

Julio 2018

Durante julio, se detectaron seis ciclones sobre la zona de estudio, sin embargo en dos casos estos ocurren de forma simultanea o uno tras otro, por lo que se consideraron como un solo evento, dando un total de 4 eventos durante el mes (figura 3.15a).

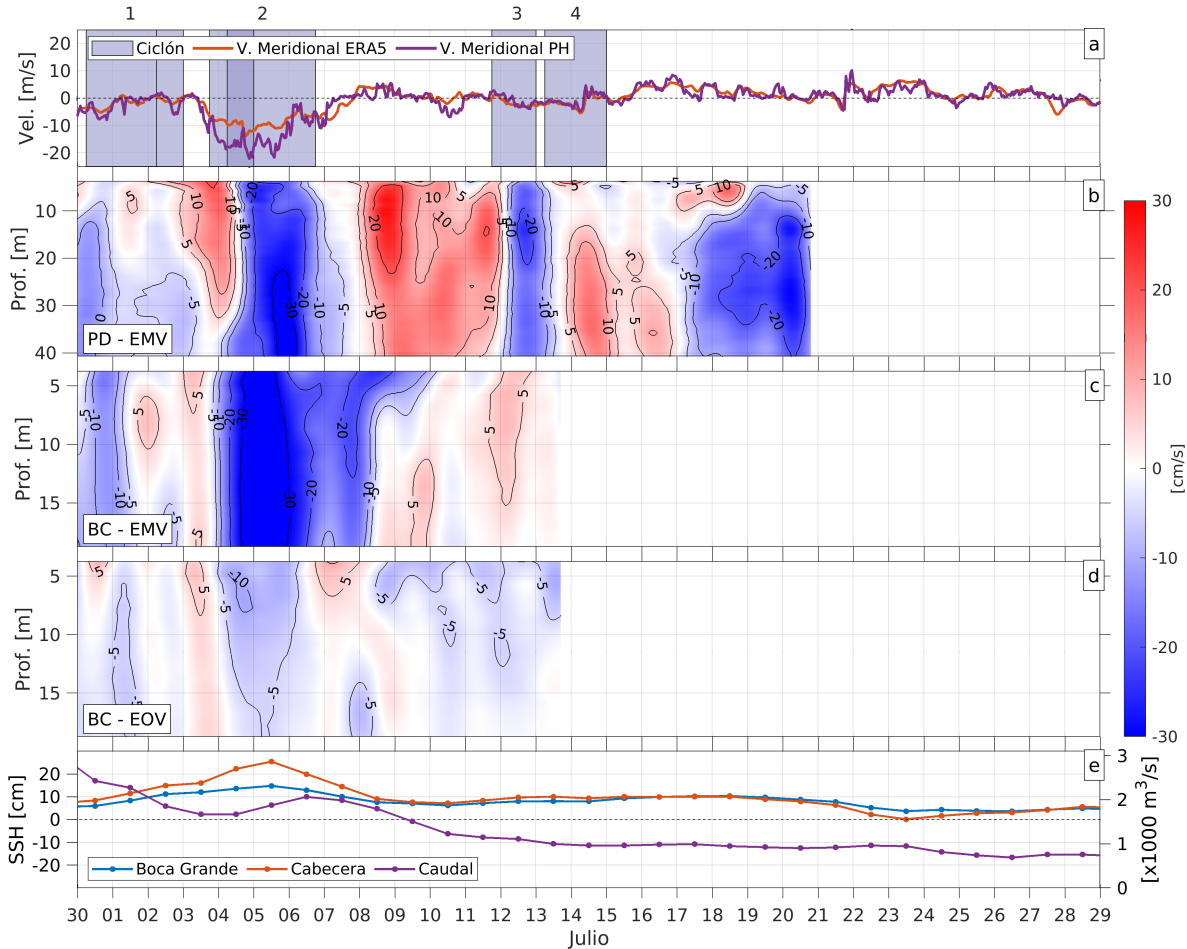


Figura 3.15: (a) Serie de tiempo del mes de julio para el viento meridional de ERA5 al interior del GA y en la estación Punta Hualpén. En gris se registra el paso de ciclones extratropicales en la región de estudio. (b) Corriente a lo largo del EMV en PD presentados en la figura 3.5, los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (c) Corriente a lo largo del EMV en BC presentados en la figura 3.5, y del (d) eje ortogonal al EMV (EOV). Los valores positivos indican entrada al golfo, mientras que los negativos indican salida. (e) Anomalías del nivel del mar para la cabecera (rojo) y para la boca grande (azul) junto al caudal del río Biobío (violeta).

El evento 1 inicia durante junio y dura 3 días, sin embargo solo presenta un viento norte durante el primer día, el cual alcanza los 5 m/s (figura 3.15a). Durante este día la circulación en PD es de doble capa con una corriente que entra al golfo desde la superficie hasta los 10 metros y que sale bajo esta profundidad. Posterior a este día las corrientes

son débiles ($<5\text{cm/s}$) (figura 3.15b). Simultáneamente, la corriente en el EMV de BC se dirige al exterior del golfo con corrientes que alcanzan los 10 cm/s a lo largo de toda la columna de agua (figura 3.15c). Estas corrientes disminuyen y cambian de dirección cuando el viento deja de dirigirse al sur. El evento 2 presentó el viento norte más intenso de todos los casos estudiados, alcanzando magnitudes de 13 m/s en los datos de ERA5 y 21 m/s de acuerdo a los datos locales (figura 3.15a). El viento mantuvo su dirección durante los tres días que duró el evento generando las corrientes de mayor intensidad en las observaciones disponibles tanto de BC como de PD. Al inicio de este evento, la corriente en PD presentó una circulación de doble capa con entrada en la superficie y salida por el fondo. A medida que los vientos continuaron, la corriente se dirigió hacia fuera del golfo a lo largo de toda la columna de agua, alcanzando velocidades de $20\text{-}30\text{ cm/s}$ (figura 3.15b). La corriente en BC presentó valores negativos tanto para el EMV como en el EOV, sin embargo las magnitudes en el EMV alcanzaron los 30 cm/s superando con creces las corrientes observadas en el EOV (figura 3.15c-d).

Durante el evento 3 y 4 el viento se dirigió al sur con magnitudes de 3 y 5 m/s respectivamente (figura 3.15a). La corriente en PD presentó un comportamiento de una capa en ambos casos, sin embargo durante el evento 3 la corriente se dirige hacia el exterior del golfo, mientras que durante el evento 4 la dirección es hacia el interior del golfo (figura 3.15b). Los datos de BC sólo se encuentran disponibles para el evento 3, donde la corriente presentó una dirección hacia el interior del golfo en el EMV y hacia el sur en el EOV, en ambos casos con magnitudes cercanas a 5 cm/s (figura 3.15c-d).

Durante todos los eventos la anomalía del nivel del mar en la cabecera del golfo fue superior a lo presentado en boca grande (figura 3.15e). Esto se muestra con mayor evidencia durante el evento 2, donde la anomalía del nivel del mar en la cabecera superó en más de 10 cm a la anomalía en boca grande. El caudal en el río Biobío presentó variaciones durante el mes, sin embargo esto ocurre posterior a los cambios en las corrientes por lo que no parece afectar la circulación en los dos puntos estudiados (figura 3.15e).

3.5. Relación entre el viento y las corrientes

3.5.1. Modos de variabilidad de las corrientes

Las EOF obtenidas a partir de los anclajes de BC muestran un comportamiento similar durante los dos periodos estudiados, con una estructura de una capa en el primer modo de variabilidad, mientras que el segundo modo presenta una estructura de doble capa. Durante 2016 (figura 3.16) el primer modo concentra 80.1% de la varianza total de ambas

componentes, con mayores amplitudes en superficie cerca de los 5 metros. Este modo se encuentra alineado en una dirección similar a la del EMV presentado en la figura 3.5. En contraste, el segundo modo, que suma el 8.7% de la varianza, presenta una estructura de doble capa con un nodo a los 7 metros. Las mayores amplitudes de este modo se concentran en la superficie. Cerca del fondo la amplitud disminuye progresivamente y alcanza valores cercanos a cero, lo que indica que este modo se limita a las capas más superficiales.

Durante el periodo 2018 (figura 3.17), la varianza acumulada en el primer modo alcanza el 81.3%. Similarmente a lo observado durante 2016, el primer modo presenta una estructura de una capa alineada con el EMV (figura 3.5). Durante este periodo, la variación entre superficie y fondo es menor, sin embargo se observan menores amplitudes a medida que aumenta la profundidad. El segundo modo concentra el 8.9% de la varianza total con una estructura baroclínica y un solo nodo a los 10 metros. Esta estructura representa una rotación de las corrientes con la profundidad, donde la mayor amplitud se observa en las capas más superficiales.

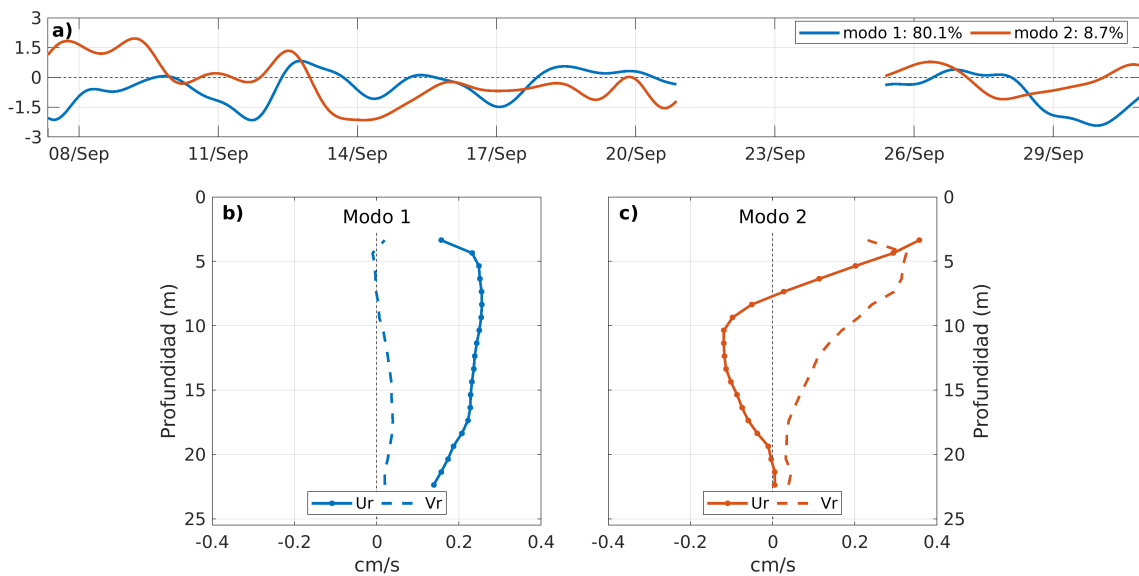


Figura 3.16: (a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Boca Chica durante la campaña 2016. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de Ur presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5.

Al igual que en los datos de BC, los EOFs de PD exhiben una estructura similar durante los dos periodos analizados. En 2016, el primer modo acumula el 59.2% de la varianza total, mientras que el segundo modo alcanza el 25.7% (figura 3.18). Esta tendencia cambia en 2018, donde el primer modo abarca el 78.6% de la varianza, y el segundo modo se reduce a un 12.7% (figura 3.19).

La EOF del primer modo durante 2016 presenta una estructura alineada con el EMV

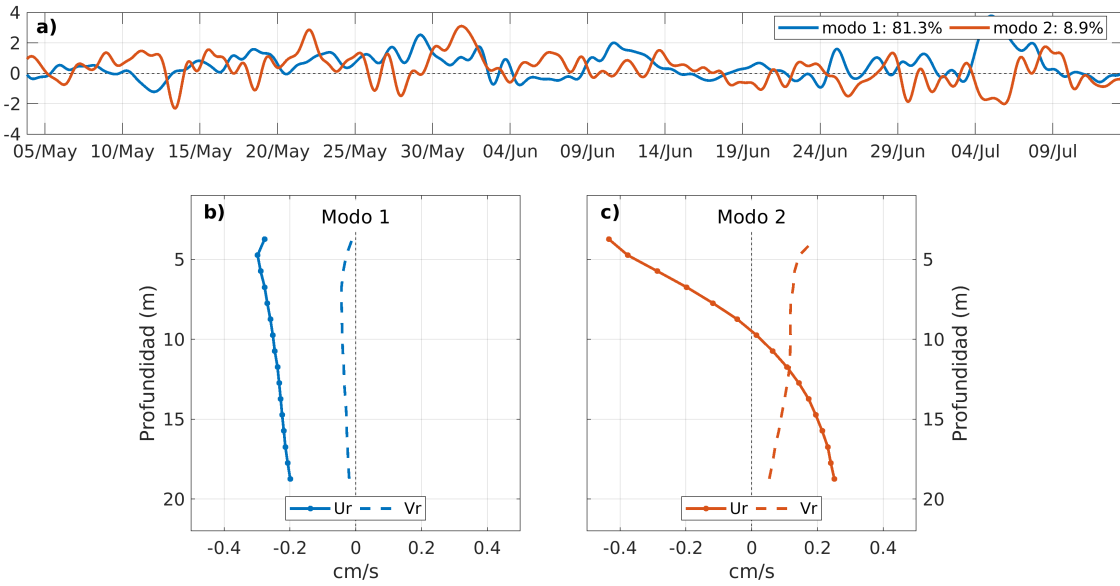


Figura 3.17: (a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Boca Chica durante la campaña 2018. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de U_r presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5.

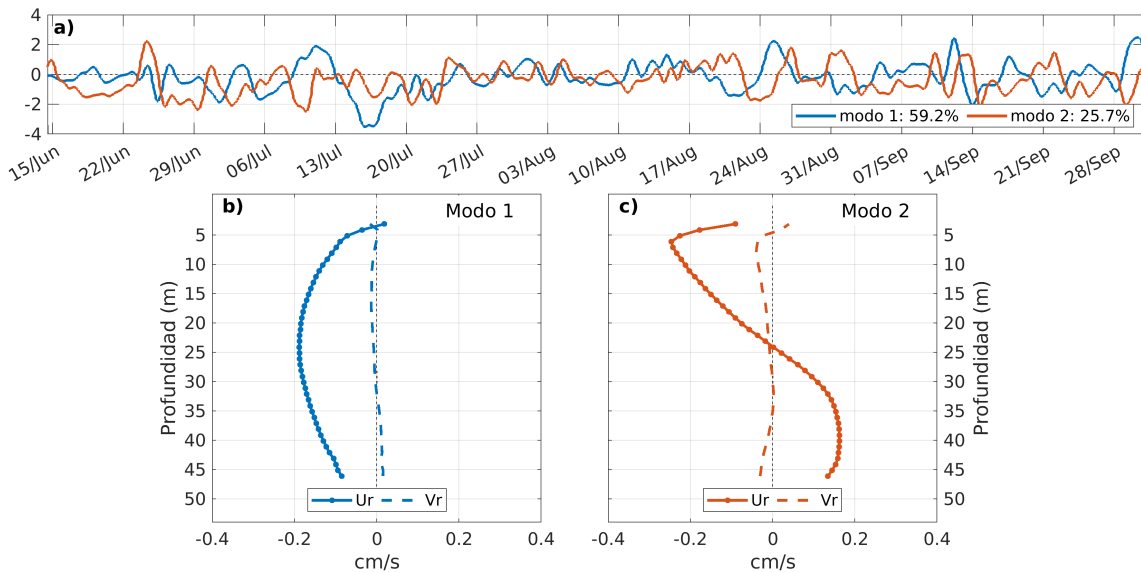


Figura 3.18: (a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Punta Delicada durante la campaña 2016. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de U_r presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5.

presentado en la figura 3.5 para este periodo. Esta amplitud varía con la profundidad, alcanzando su máximo en profundidades medias, entre los 20 y 30 metros de profundidad. Sobre los 4 metros de profundidad las amplitudes del EOF son muy bajas y presentan un

cambio de dirección (figura 3.18b). Bajo esta profundidad, la estructura no presenta nuevos nodos. Similarmente al primer modo, el segundo modo también se orienta principalmente a lo largo del EMV presentado en la figura 3.5. Este modo exhibe una estructura baroclínica con un nodo a los 25 metros (figura 3.18c).

El primer modo de las corrientes submareales durante 2018 muestra una estructura vertical sin cambios de dirección a lo largo de toda la columna (figura 3.19b). Esta configuración vertical, nuevamente alineada con el EMV alcanza sus amplitudes máximas entre los 25 y 35 metros. Además, la EOF del segundo modo también presenta una estructura baroclínica con un nodo a los 25 metros (figura 3.19c).

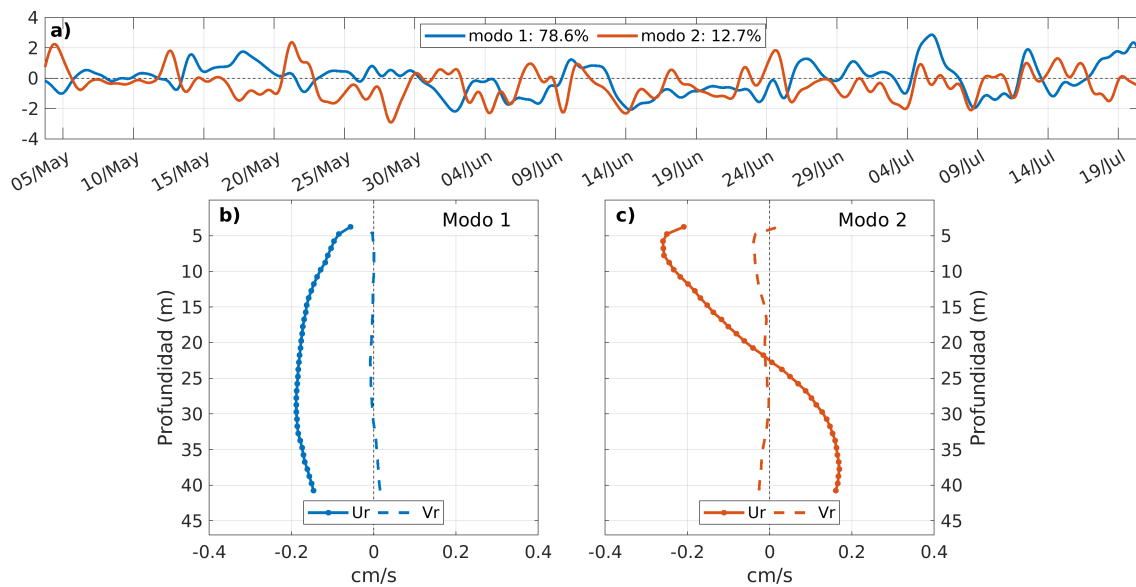


Figura 3.19: (a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente en Punta Delicada durante la campaña 2018. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal. La orientación de U_r presenta la misma dirección del eje de máxima varianza (EMV) indicada en la figura. 3.5.

El análisis de EOF combinado para las corrientes de ambos anclajes del periodo 2018 presentó un primer modo que concentra el 59.4% de la variabilidad y un segundo modo que concentra el 21.8%, lo que sugiere una respuesta conjunta de ambas regiones (figura 3.20a).

La EOF del primer modo en ambas regiones guarda similitud con lo presentado en los análisis individuales donde se observa una estructura vertical sin cambios de dirección con la profundidad (figura 3.20b y d). Sin embargo, se observó que la estructura vertical de BC presentó las mayores amplitudes en las capas mas profundas a diferencia de la estructura vertical observada en el análisis individual donde estas se presentaban en superficie. Esta variabilidad parece estar incluida en el segundo modo, donde a diferencia de la estructura

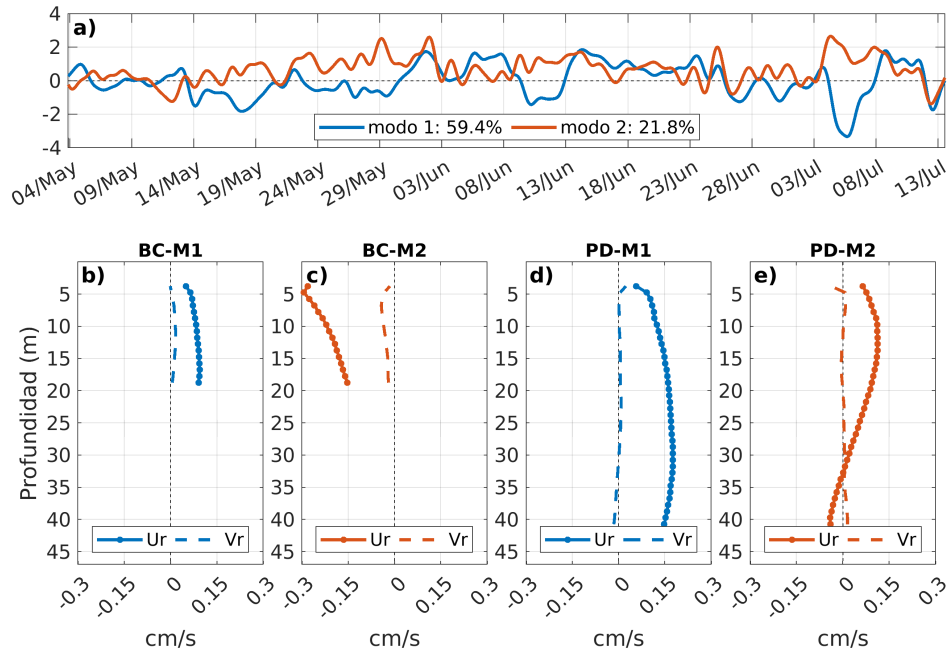


Figura 3.20: (a) Componente principal del primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico (EOF) de las corrientes en Boca Chica y Punta Delicada durante la campaña 2018. Estructura vertical del (b) primer y (c) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal rotada en BC. Estructura vertical del (d) primer y (e) segundo modo ortogonal empírico (EOF) de la corriente submareal rotada en PD.

baroclínica observada en los análisis por separado (figura 3.17c), la estructura se mantiene sin cambios de dirección con la profundidad pero con mayores amplitudes en superficie (figura 3.20c).

Al contrario, la corriente en PD no presenta grandes variaciones con lo analizado de forma individual. Esto se puede apreciar tanto en los porcentajes de variabilidad explicados por cada modo, como en las estructuras de ambos. A pesar de esto, se observa que la estructura del segundo modo presenta el nodo de cambio de dirección a los 35 metros de profundidad (figura 3.20e) en contraste a los 25 metros observados en la figura 3.19c.

Es importante destacar que todas estas estructuras se encuentran alineadas con el EMV presentado en la figura 3.5.

3.5.2. Correlación entre el viento y los modos de variabilidad de las corrientes

Esta sección presenta la correlación cruzada entre los componentes principales obtenidos en la sección 3.5.1 y la componente meridional del viento observado en Punta Hualpén.

En el caso de BC durante 2016, es evidente que el primer modo mantiene una variación

similar a lo observado en la componente meridional del viento ya que oscilan de igual forma y presentan un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.76 (figura 3.21a). Este valor aumenta a 0.81 cuando se realiza un desfase de 4 horas (figura 3.21c). El segundo modo, en contraste, presenta un comportamiento diferente al viento, ya que el valor de R entre ambas series es solo de 0.07 (figura 3.21b). La correlación aumenta a 0.51, cuando el desfase es de 65 horas (figura 3.21c).

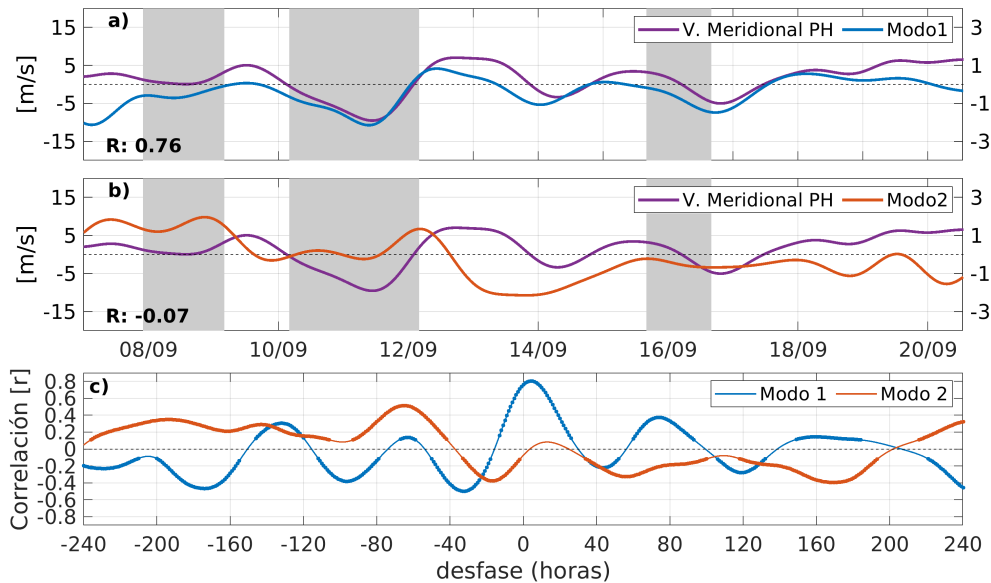


Figura 3.21: Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto a la componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2016. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2016.

La correlación entre el viento meridional y el modo 1 de BC disminuye para el periodo 2018, alcanzando un R de -0.42 cuando no hay desfase (figura 3.22a). Este valor alcanza la máxima correlación ($R=-0.55$) cuando el desfase es de -23 horas (figura 3.22c). Cabe destacar que los valores máximos de la componente principal presenta su mayor amplitud durante los eventos de viento norte asociados al paso de ciclones, esto es particularmente notorio en el evento posterior al 2 de julio. El modo 2 presentó una correlación con el viento de 0.59 y alcanzó un máximo de 0.6 con un desfase de -4 horas. La correlación entre los componentes principales del primer y segundo modo de las corrientes en PD para la campaña 2016 y el viento en Punta Hualpén presentó valores de -0.28 y 0.49 respectivamente (figura 3.23a,b). La máxima correlación entre el primer modo y el viento se obtuvo al retroceder el componente principal en 23 horas, mientras que el desfase del segundo modo fue de 4 horas. En ambos casos la correlación fue de -0.55 (figura 3.23c).

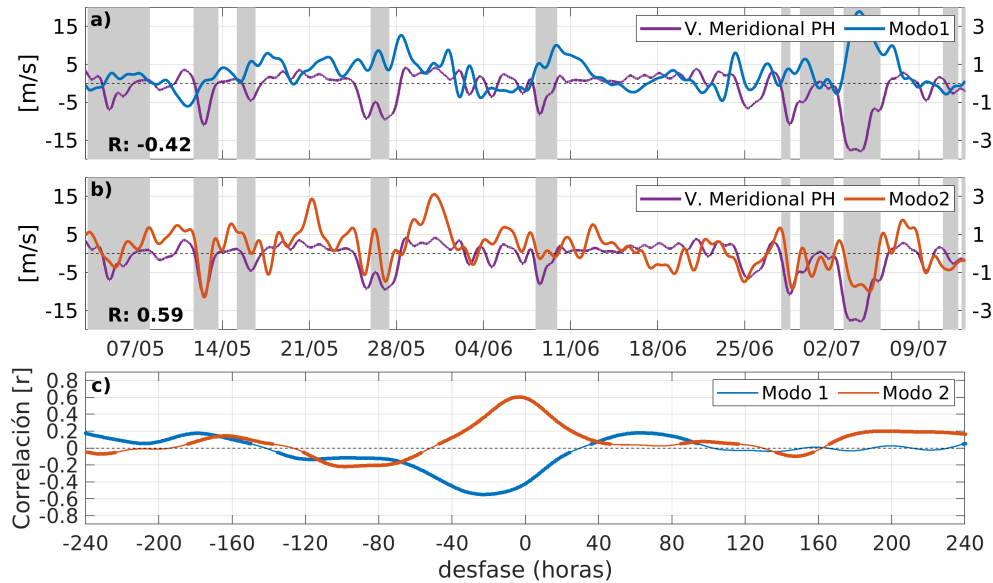


Figura 3.22: Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2018. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC durante la campaña 2018.

Durante la campaña de 2018, las correlaciones para los mismos datos fueron de -0.33 y 0.21 y alcanzaron máximos de -0.5 y 0.23 con desfases de 19 y 5 horas respectivamente.

La correlación entre el viento y el componente principal del primer modo de la EOF compuesta entre las corrientes de BC y PD durante la campaña 2018 fue de 0.45. Este valor aumenta a 0.66 cuando el desfase entre ambas series es de -19 horas, superando la correlación con el viento que presenta cada anclaje por separado. En contraste, el segundo modo presentó correlaciones muy bajas, siendo todas inferiores a 0.24, independiente del desfase entre las series.

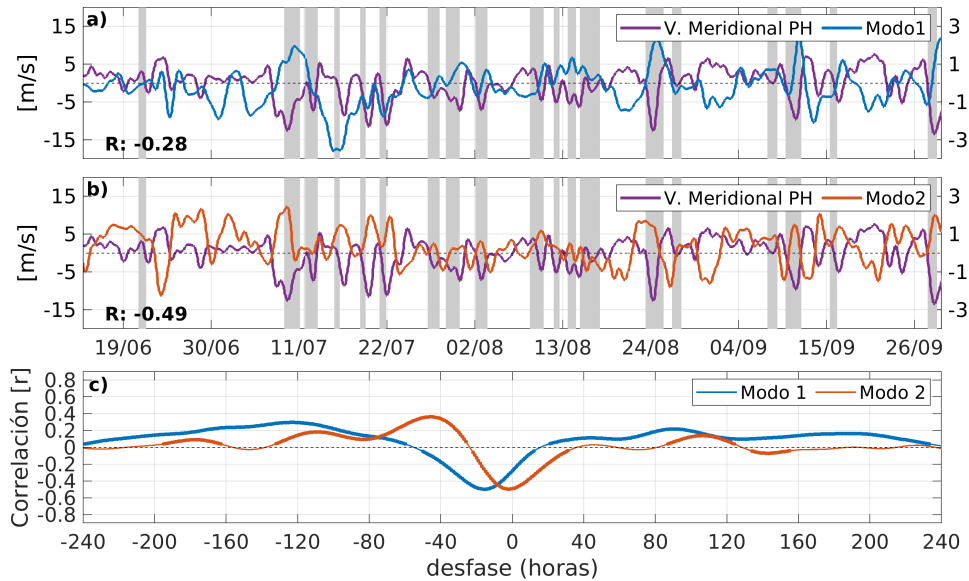


Figura 3.23: Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2016. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2016.

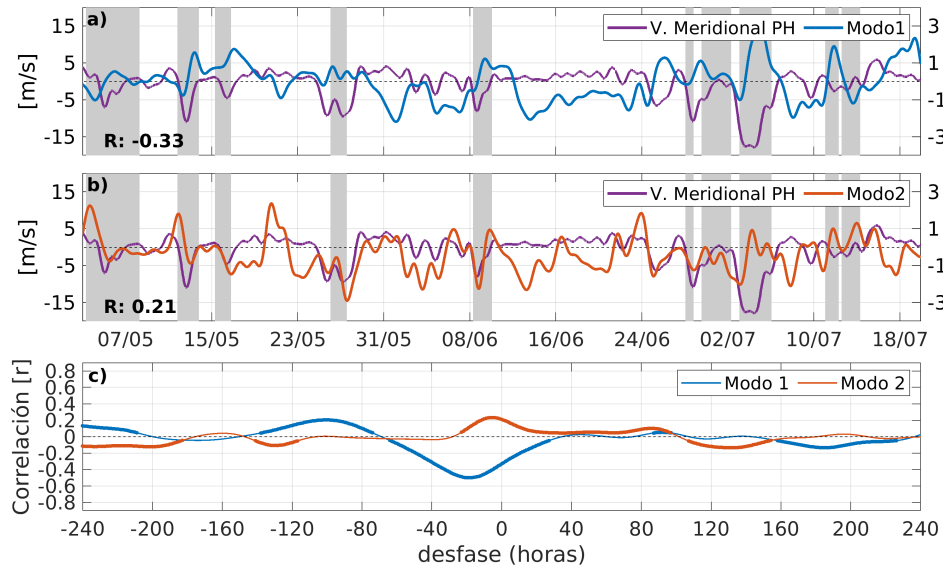


Figura 3.24: Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2018. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en PD durante la campaña 2018.

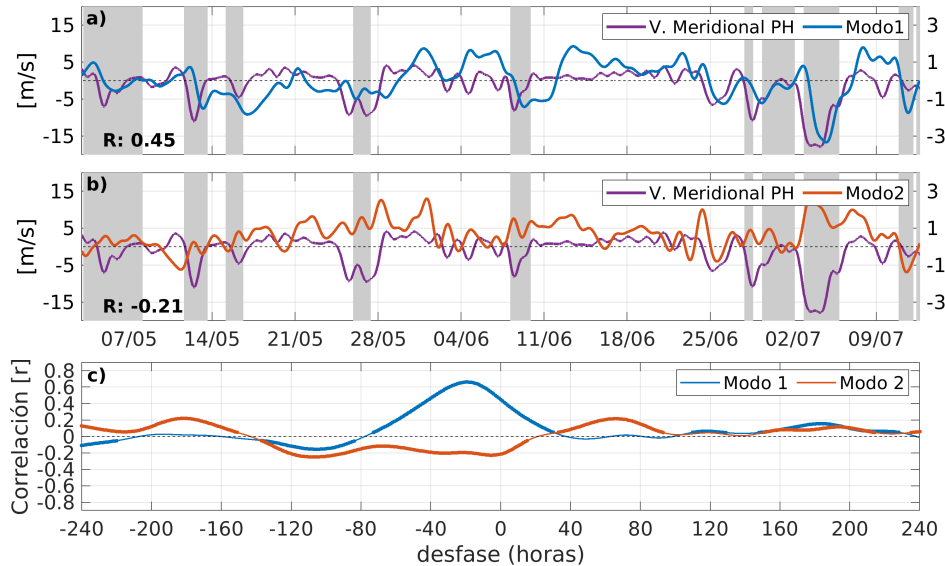


Figura 3.25: Serie de tiempo de la componente meridional del viento en PH (violeta) junto al componente principal del (a) primer y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal de las corrientes en BC y PD durante la campaña 2018. En gris se muestra el paso de ciclones extratropicales detectados dentro de la zona de estudio. (c) Correlación con desfase entre la componente meridional en PH y el primer (azul) y segundo (rojo) modo ortogonal empírico de la corriente submareal en BC y PD durante la campaña 2018

3.5.3. Ondeletas de coherencia entre el viento y corrientes

Las ondeletas de coherencia realizadas entre el viento y los componentes principales de los modos de variabilidad permitieron analizar los periodos en que las serie comparten variabilidad y por lo tanto presentaron una mayor relación. En el caso de BC durante 2016, el viento (figura 3.26a) presentó una coherencia significativa con el primer modo a lo largo de toda la serie estudiada, especialmente en los periodos mayores a 64 horas (2.6 días). La coherencia entre estas dos series también presentó máximos en los periodos menores a 64 horas entre el 11 y el 17 de septiembre, coincidiendo con el paso de ciclones sobre la zona. Estos máximos en coherencia presentaron fases que oscilan entre 0 y 50°, lo que indica que el océano actúa en conjunto o levemente antes que el viento, algo que se observa claramente en la figura 3.21a. La coherencia entre el viento y el segundo modo presentó máximos de coherencia entre las 64 y 128 horas a lo largo de la mayor parte de la serie con una fase de 90°.

Para el periodo 2018 (figura 3.27a), la coherencia entre el viento y el componente principal del primer modo de variabilidad no presenta valores significativos en los periodos de 64 horas (2.6 días). Se presentaron máximos significativos con una fase de 90-120° en los periodos de 128 horas (5.3 días) para los periodos entre el 3 y 21 de mayo y para el 26 y 11

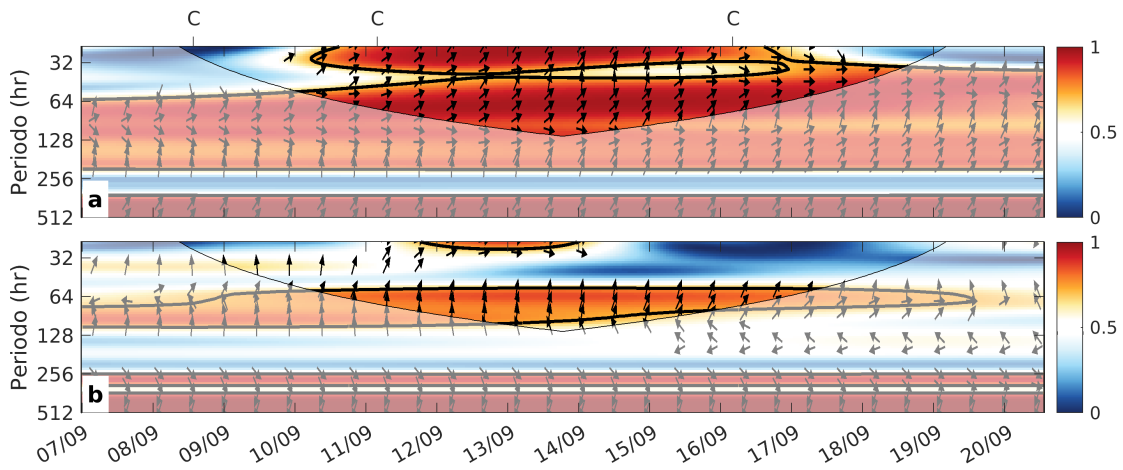


Figura 3.26: Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Boca Chica durante la campaña 2016. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.

de julio, los cuales coinciden con el paso seguido de ciclones extratropicales sobre la zona. Cabe destacar que se presentó un máximo significativo entre 24 y 48 horas durante todos los eventos de paso de ciclón con duración menor a 36 horas. La coherencia del viento con el componente principal de segundo modo de variabilidad (figura 3.27b) presentó máximos significativos en fase entre 128 y 256 horas en toda la primera mitad de la serie y posterior al 29 de junio. Este periodo coincide con la presencia de ciclones consecutivos en la región. Por otra parte, presentó máximos significativos, también en fase, en 64 horas centrados en los eventos del 6, 12 y 27 de mayo.

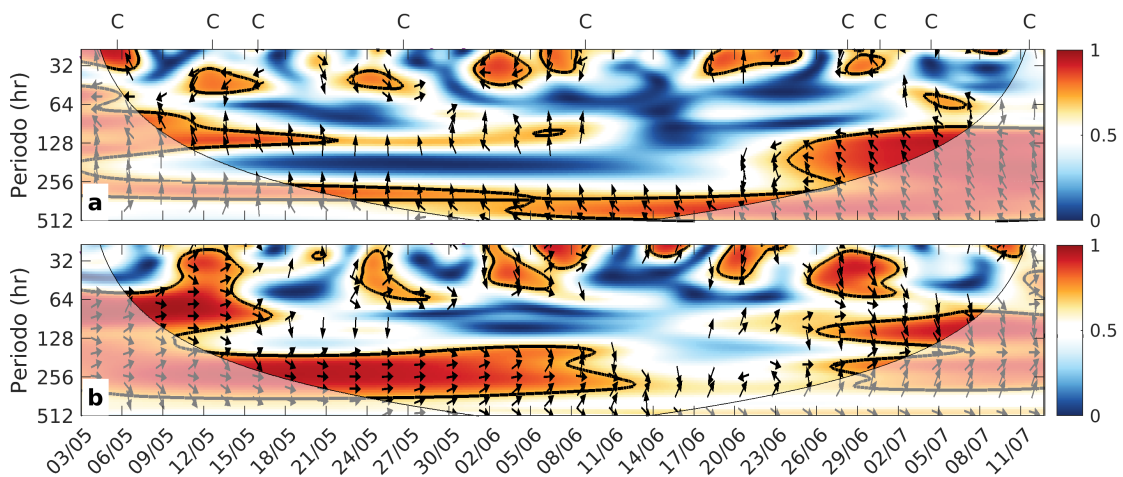


Figura 3.27: Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Boca Chica durante la campaña 2018. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.

Las ondeletas de coherencia para el viento y el componente principal del primer modo de PD para la campaña 2016 (figura 3.28a) presentó un máximo significativo centrado en 256 horas (10.6 días) a lo largo de toda la serie. En los periodos entre 24 y 64 horas (1-2.6 días) se presentaron máximos con fases de 90° en diferentes periodos de la serie los cuales mayoritariamente coinciden con el paso de 3 o más ciclones sobre la región de forma consecutiva. La banda entre 128 y 256 horas (5-10 días) presentó coherencia significativa entre el 13 de agosto y el final de la serie con fases entre 180 y 270° . La ondeleta del viento con el segundo modo (figura 3.28b) mostró alta coherencia en los periodos centrados en 64 horas (2.6 días), especialmente entre el 20 de junio y el 13 de agosto y para el periodo entre el 3 y 27 de septiembre. Además se observó alta coherencia en los periodos de mayor frecuencia (<2 días) de forma intermitente a lo largo de la serie.

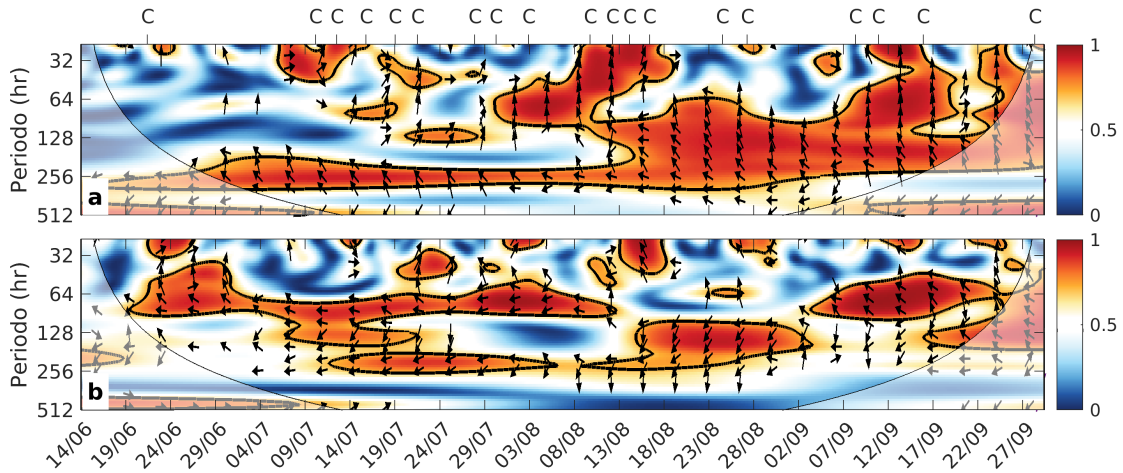


Figura 3.28: Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Punta Delicada durante la campaña 2016. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.

Similarmente para la campaña de 2018, la ondeleta de coherencia entre el viento y la componente principal del primer modo presentó alta coherencia en los periodos menores a 64 horas (2.6 días) de forma intermitente, los cuales además de estar en su mayoría en fase, coinciden con el paso de ciclones sobre la región de estudio (figura 3.29a). Entre las 64 y 128 horas (2.6 - 5.3 días) se observaron dos zonas con valores de coherencia significativos, las cuales corresponden al periodo entre el 3 y el 19 de mayo y entre el 22 de junio y el 7 de julio. Junto con lo anterior, se observaron coherencias significativas en los periodos superiores a las 256 horas, sin embargo estas no corresponden a los periodos de los eventos estudiados. En contraste, la ondeleta de coherencia entre el viento y la componente principal del segundo modo no presentó valores significativos en periodos mayores a 128 horas (figura 3.29b) y los valores significativos de coherencia aparecen de

forma discontinua en épocas similares a lo observado en la coherencia con el primer modo.

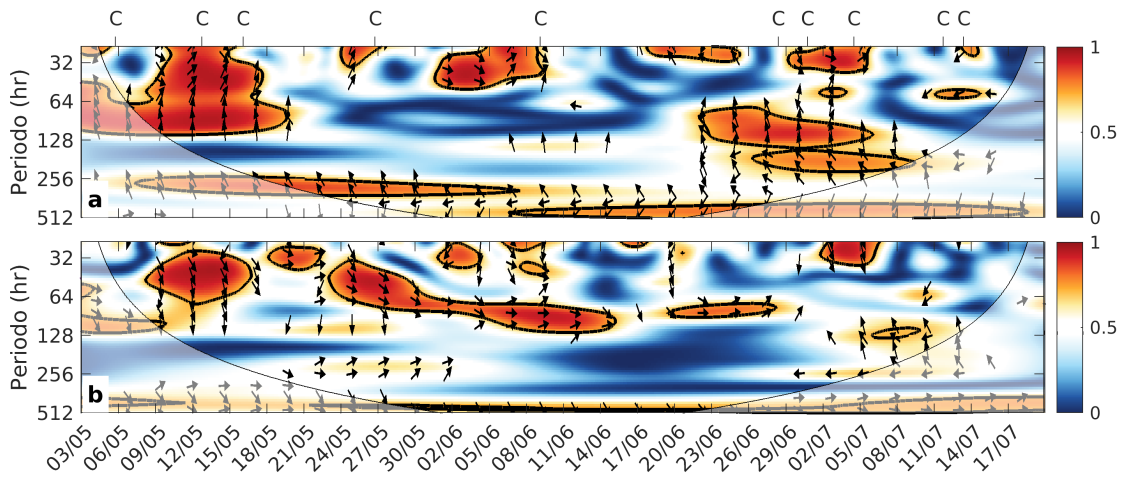


Figura 3.29: Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Punta Delicada durante la campaña 2018. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.

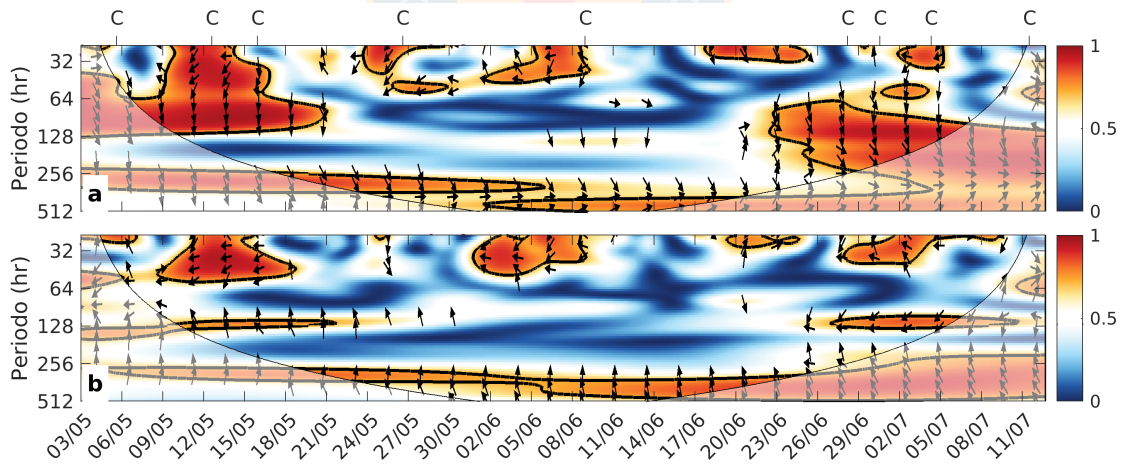


Figura 3.30: Wavelet de coherencia entre la componente meridional del viento en Punta Hualpén y la componente principal del (a) primer modo y (b) segundo modo ortogonal empírico de la corriente submareal en Boca Chica y Punta Delicada durante la campaña 2018. El paso de ciclones extratropicales sobre la zona se marca con una letra C.

En el caso de la ondeleta de coherencia entre el viento y la componente principal el primer modo de las corrientes en ambos puntos durante la campaña 2018 (figura 3.30a) mostró un patrón muy similar a lo observado en las figuras 3.27a y 3.29a, con coherencia significativa en los periodos superiores a 256 horas y en la banda entre 64 y 128 horas para los periodos entre el 3 y el 19 de mayo y posterior al 22 de junio con una fase de 270° . Los máximos de coherencia en la banda de periodos menores a 64 horas aparecen centrados

en los mismos periodos que los observados en cada punto por separado, lo que indica que la variabilidad capturada por el primer modo de la EOF durante estos eventos es compartida en ambas ubicaciones. El análisis con el segundo modo de variabilidad (figura 3.30b) presentó alta coherencia en antifase en la banda de periodos menores a 64 horas en 3 secciones, estos están centrados en el 12 de mayo, el 5 de junio y el 1 de julio. Además se observó una coherencia significativa a lo largo de toda la serie para periodos superiores a 256 horas con una fase de 90° .



CAPÍTULO 4

Discusión

4.1. Paso de ciclones extratropicales sobre Chile central

El presente estudio analizó la respuesta hidrodinámica del golfo de Arauco al paso de ciclones extratropicales durante dos periodos invernales. Esta investigación se enfocó en una caracterización detallada de los ciclones extratropicales en la región, proporcionando información valiosa sobre su frecuencia, tendencias y relación con los intensos vientos del norte a lo largo de las últimas cuatro décadas. Si bien, el algoritmo de detección seleccionado en este trabajo ha sido utilizado para detectar circulaciones anticiclónicas en la costa de Chile (Aguirre et al., 2021), y circulaciones ciclónicas en Sudamérica (Bitencourt et al., 2011), el enfoque específico en Chile central representa una contribución significativa a este campo de estudio. A diferencia de investigaciones anteriores que se centraron en el paso de ciclones extratropicales durante intervalos temporales más limitados (Crespo et al., 2022; Mendes et al., 2010), este trabajo se distingue por su análisis exhaustivo y prolongado de las tendencias de ciclones extratropicales en esta área geográfica específica.

Uno de los hallazgos más significativos de esta caracterización fue la disminución en el número de ciclones extratropicales que afectaron el golfo de Arauco durante el periodo 1979-2021, con una tasa de reducción de 0.1 ciclones al año. Esta disminución es consistente con lo planteado en Aguirre et al. (2018), donde se menciona un fortalecimiento y desplazamiento hacia el polo del anticiclón del Pacífico, lo que podría estar influyendo en la frecuencia de estos eventos meteorológicos en la región.

Otra relación cuantificada fue aquella entre los eventos de viento norte intensos y el paso de ciclones sobre la zona. Aunque la relación entre ambos fenómenos está ampliamente estudiada (Barrett et al., 2011; Befort et al., 2019; Bitencourt et al., 2011; Domingues et al., 2019; Gómez et al., 2021; Ulbrich et al., 2009; Viale y Nuñez, 2011), este estudio determina que el principal fenómeno atmosférico que genera viento norte extremo son los ciclones extratropicales. Los resultados indican que el 79% de las veces en que el viento norte supera los 9 m/s (lo que coincide con el 5% de los vientos más intensos en los últimos 40 años) es debido al paso de un ciclón entre los 30° y 50°S. El 21% restante

de estos eventos también tiene su origen en ciclones extratropicales de gran envergadura, sin embargo estos presentan una trayectoria al sur de los 50°S, por lo que no fueron considerados en el contexto de este estudio.

4.2. Respuesta del golfo de Arauco al paso de ciclones extratropicales

El análisis de los resultados obtenidos en este trabajo destaca la complejidad y el dinamismo de los sistemas costeros, particularmente debido al gran número de variables que intervienen en la modulación de las corrientes en estas regiones (Largier, 2020). Las corrientes costeras examinadas en este estudio exhiben una marcada variabilidad sinóptica, característica de esta región (Sobarzo et al., 2022). A pesar de esto, se observaron patrones comunes entre ambos periodos invernales, tales como la orientación y estructura vertical de las corrientes medias, las frecuencias más energéticas y el porcentaje de variabilidad y estructura obtenido en el análisis de EOF. Esto sugiere que los patrones descritos en este estudio son representativos del periodo invernal. Futuros estudios enfocados en la región deberán evaluar la persistencia o variabilidad de estos patrones de circulación bajo el contexto de cambio climático o de fenómenos de mayor escala como El Niño-Oscilación del Sur.

El aumento de la coherencia entre los modos de variabilidad y el viento meridional durante el paso de ciclones extratropicales, indica una influencia directa de estos fenómenos atmosféricos, a través del viento, en la generación y modulación de las corrientes al interior del golfo de Arauco. Por otro lado, los análisis de correlación revelaron variaciones dependiendo de los modos de variabilidad, la región de estudio y los periodos estudiados. Por ejemplo, las corrientes en BC en ambos periodos mostraron correlaciones significativas con coeficientes superiores a 0.5 tanto en su primera componente principal (la cual concentra sobre el 80 % de la varianza submareal), como en su segunda componente. Estos resultados refuerzan y amplían la relación ya establecida entre los vientos del norte y las corrientes tanto en esta región (Parada et al., 2001) como en áreas adyacentes, tales como la bahía de Concepción y la plataforma del Itata (Ahumada et al., 1983; Sobarzo et al., 2022). Es importante destacar que la corta duración de la serie temporal durante 2016 podría resultar en una suavización de la variabilidad de las corrientes para este periodo, lo que implica que los análisis derivados de estos datos podrían enmascarar las relaciones entre las corrientes y el viento meridional.

En el caso de PD, las corrientes también presentaron una respuesta al viento similar

durante los dos periodos analizados, especialmente en el tiempo de respuesta a este forzante. Esto se evidencia en las correlaciones con desfase temporal, donde el primer modo, que refleja un comportamiento de una capa, alcanzó su máxima correlación con desfases de 23 y 19 horas para los datos de 2016 y 2018 respectivamente. Estos tiempos de respuesta al viento meridional son similares a los observados en el entorno del cañón del Biobío (Sobarzo et al., 2001), indicando una respuesta oceánica coherente en diferentes áreas dentro del golfo frente a la influencia de los factores atmosféricos. Por otro lado, el segundo modo, que corresponde a la respuesta de doble capa, presentó una correlación máxima con desfases de 4 y 5 horas para los mismos periodos. No obstante, es importante señalar que la máxima correlación con el segundo modo de la campaña 2018 fue relativamente baja ($R=0.23$), indicando una conexión menos directa en este periodo. Estos resultados sugieren que los modos de variabilidad de las corrientes en PD no concentran su reacción al viento en un único patrón, sino que la descomponen en dos modos distintos. Más aún, los análisis de coherencias entre el viento meridional y los modos de variabilidad mostraron que, al igual que en BC, esta relación es máxima durante los periodos asociados al paso de ciclones extratropicales sobre la región.

El análisis de las corrientes durante cada uno de los eventos de ciclones extratropicales presentó una alta variabilidad, no obstante, se pudo identificar un patrón recurrente, particularmente en aquellos casos donde la intensidad del viento norte es mayor. Consistentemente con los análisis de correlación, este comportamiento se caracterizó por un flujo de salida de una sola capa por BC y un comportamiento de doble capa en PD, con entrada al golfo por superficie y salida en las capas más profundas. Este patrón es coherente con el observado en otros cuerpos de agua semicerrados con múltiples salidas al océano, como el caso de la ria de Pontevedra, donde las conexiones al océano más someras presentan circulaciones de una capa, mientras que la entrada más profunda presenta una circulación de dos capas (Cruz et al., 2021).

Para evidenciar este comportamiento recurrente, se calculó el promedio de dichos eventos (figura 4.1), donde se incluyen todos aquellos descritos en la sección 3.4, en que el viento norte presentó una magnitud superior a 5 m/s. Dada esta selección, la figura 4.1b corresponde al promedio de 3 eventos obtenidos en BC durante septiembre de 2016, mientras que la figura 4.1c es el promedio de los 8 eventos en BC durante la campaña 2018. En el caso de PD, la figura 4.1d incluye 17 eventos del periodo 2016, mientras que la figura 4.1d representa los mismos 8 eventos del periodo 2018.

En esta figura se observó que, en promedio, el viento norte de mayor intensidad se presentó 24.9 horas después de la aparición de un ciclón extratropical en la zona, tal como se muestra en la figura 4.1a. La aparición del ciclón coincide con el cambio de dirección en

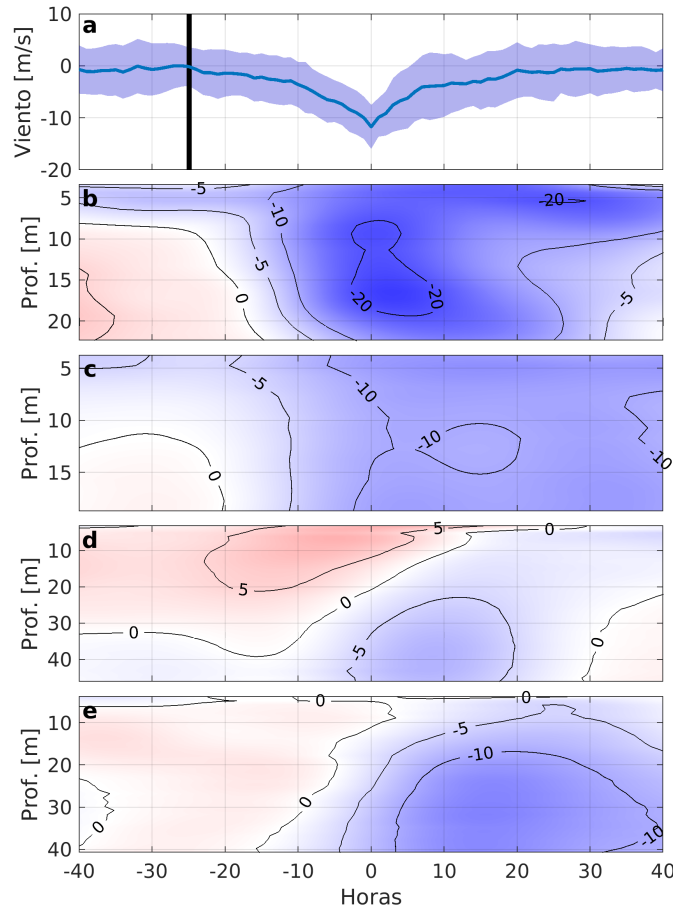


Figura 4.1: (a) Promedio del viento en Punta Hualpén junto a su desviación estándar. En negro se muestra el tiempo promedio en el que aparece un ciclón extratropical en la zona antes del viento norte máximo. Compuesto de las corrientes para (b) BC2016, (c) BC2018, (d) PD2016 y (e) PD2018.

el viento meridional, el que se vuelve progresivamente más negativo, hasta su máximo en t_0 . Como resultado, en BC se observa una transición de corrientes débiles a corrientes con una dirección marcadamente negativa tras el máximo del viento norte (t_0). Mientras tanto, en PD se observa que entre t_{-24} y t_0 las corrientes se mueven en una sola capa con una dirección de entrada al golfo. Esta corriente de entrada se limita a la superficie durante el máximo de viento norte (t_0), ya que aparece una corriente de salida desde profundidades medias hasta el fondo. A medida que el viento norte disminuye en magnitud, entre 20 y 40 horas después del máximo, las corrientes vuelven a moverse en una sola capa, fluyendo hacia fuera del golfo con magnitudes cercanas a 0 cm/s cerca de la superficie y a -10 cm/s cerca del fondo. Este comportamiento es consistente con el observado en el estudio de Parada et al. (2001) el cual caracterizó la circulación del GA durante vientos favorables a la surgencia y a la subsidencia. En este trabajo se observó que durante un evento de

viento norte relativamente intenso, entre el 11 y 13 de marzo de 1996, las corrientes en PD presentan un comportamiento de doble capa, con entrada cerca de la superficie (10m) y salida por el fondo (28m) durante el día de viento máximo (día 11). En los dos días posteriores, a medida que la intensidad del viento norte disminuye, la circulación presentó una salida de agua en PD a lo largo de toda la columna, con intensidades mayores en el fondo.

Estos antecedentes tienden a confirmar el mecanismo propuesto al inicio de este trabajo, el cual sugiere una entrada superficial de agua por PD y una salida de agua por BC durante el paso de un ciclón extratropical sobre la zona. Este comportamiento también se ha observado en otras bahías, como el caso de la bahía de Monterrey, donde las corrientes superficiales tienden a fluir hacia el interior de la bahía en su extremo más próximo al ecuador, mientras que en el extremo que se orienta hacia los polos, se observa un flujo de salida (Paduan et al., 2018).

La serie de eventos que se desencadenan a partir del paso de estos ciclones permite proponer el siguiente mecanismo de respuesta al interior del golfo de Arauco: Cuando se aproxima un ciclón extratropical a las costas de Chile, impulsa vientos que soplan desde el norte. Si estos vientos alcanzan una magnitud suficiente (aproximadamente superior a 5 m/s), provocan un efecto de arrastre de agua a través de la boca Grande del golfo, resultando en un movimiento de transporte superficial hacia la cabecera del mismo. Esto induce un gradiente de presión desde el interior del golfo hacia el exterior que por un lado impulsa la salida de agua a través de boca Chica y por el otro, obliga a las capas subsuperficiales del golfo a salir por el oeste de boca Grande. Posterior al máximo de viento norte y a medida que disminuye su intensidad, el transporte superficial hacia la cabecera del golfo se limita. Las corrientes en el extremo occidental de la boca Grande (PD) disminuyen su magnitud en superficie, permitiendo que las corrientes de salida se extiendan a menores profundidades. Este patrón de circulación ilustra cómo un fenómeno atmosférico puede desempeñar un papel crítico en la modulación de las corrientes, lo que a su vez podría influir significativamente en diferentes procesos que ocurren en el océano, como por ejemplo la distribución de nutrientes, el transporte de larvas y especies marinas o la dispersión de contaminantes (Du y Shen, 2016; Guéry et al., 2019).

4.3. Implicaciones ambientales

A pesar de los efectos adversos comúnmente asociados con los ciclones extratropicales, como marejadas, erosión y desafíos para las actividades económicas costeras (Bitencourt et al., 2011; Parise et al., 2009), los resultados de este estudio sugieren que el paso de

estos fenómenos sobre regiones como el Golfo de Arauco puede tener un impacto positivo en términos de dinámica oceánica. En particular, el viento norte asociado a los ciclones extratropicales parece desencadenar una importante salida de agua, tanto por la boca Chica como por la región occidental de boca Grande. Este mecanismo de respuesta implica una aceleración en la renovación de las aguas, lo que sugiere una reducción en los tiempos de residencia en estas zonas.

Para evaluar este fenómeno, se realizó una estimación aproximada del volumen de agua que abandona el golfo a través de Boca Chica durante eventos de ciclones. Considerando las dimensiones de esta área (9 kilómetros de longitud y una profundidad promedio de 20 metros) y la velocidad promedio registrada de las corrientes (10-20 cm/s), se calcula que entre $1,5 \times 10^9$ y $3,1 \times 10^9 m^3$ de agua por día podrían ser expulsados, lo que representa entre el 4 y el 7.5 % del volumen de agua presente en la cabecera del golfo (área al sur de 37°S). En el caso de Punta Delicada (7 kilómetros de longitud y 50 metros de profundidad), las estimaciones presentan volúmenes dentro del mismo orden de magnitud. Estas cifras, si bien aproximadas, confirman que el paso de ciclones sobre la región impulsa un mecanismo de renovación de aguas al interior del GA.

Esta capacidad del viento de modificar los tiempos de residencia ha sido observada en otros CASC como es el caso de la bahía de Mobile y de Chesapeake, ambas ubicadas en el hemisferio norte (Du et al., 2018; Du y Shen, 2016). En el caso de la bahía de Mobile, el cambio en la dirección del viento disminuye los tiempos de residencia entre un 13 % y un 18 % con respecto a la condición de flujo medio (Du et al., 2018), mientras que en la bahía de Chesapeake este tiempo se reduce en un 10 % (Du y Shen, 2016). En ambos casos las disminuciones en los tiempos de residencia se presentan durante los meses de invierno, lo cual es consistente con los hallazgos en nuestro estudio, donde la mayor frecuencia de ciclones extratropicales ocurre durante esta estación.

Adicionalmente, estudios locales recientes han vinculado el aumento en los tiempos de residencia al interior del golfo con altas presiones migratorias (perturbaciones de alta presión atmosférica), un fenómeno directamente opuesto en términos de la dinámica atmosférica (Mardones et al., 2022; Wong et al., 2021). Este aumento se asocia con una intensificación del viento sur a lo largo de la costa, en la dirección contraria al viento forzado por los ciclones extratropicales. De forma similar, en la Bahía de Mejillones, se han registrado mayores tiempos de residencia bajo condiciones de viento favorables a la surgencia, debido a la formación de sombras de surgencia (Marín et al., 2003). Todos estos antecedentes favorecen la idea de que el paso de los ciclones extratropicales es un mecanismo que permite la renovación de las aguas al interior del golfo.

Por lo tanto, una disminución en la frecuencia de los ciclones extratropicales podría te-

ner implicaciones considerables en la calidad del agua en el Golfo de Arauco, especialmente teniendo en cuenta el aumento sostenido de la actividad urbana, pesquera e industrial en la región (Holon SpA, 2020). Aunque los resultados de este estudio muestran una tendencia negativa en la frecuencia de ciclones, es crucial reconocer que este no es el único mecanismo que presenta el golfo en términos de renovación de aguas. De hecho, se ha observado que existen eventos de salida de agua a través de la boca Chica que no coinciden con el paso de un ciclón extratropical, lo que sugiere la presencia de variados mecanismos de renovación de aguas al interior del golfo. Estos aspectos de la circulación no parecen estar forzados por el viento y probablemente estén relacionados con fenómenos como ondas sinópticas (Djurfeldt, 1989). No obstante, estos aspectos, que podrían ser significativos, no son materia de discusión en esta tesis y sugieren una vía interesante para investigaciones futuras.

Finalmente, es importante tener en cuenta que este estudio presenta algunas limitaciones. Los datos utilizados son limitados a dos periodos y representan únicamente la región más externa del golfo. Por lo que para obtener una comprensión más completa de la circulación invernal y su relación con el viento, futuros estudios deberían concentrarse en obtener datos simultáneos tanto en las regiones costeras del golfo como en las áreas de conexión con el océano. Ampliar el alcance de los datos permitiría una visión más detallada de las interacciones entre las corrientes y el viento en diferentes áreas del golfo y brindaría información valiosa para una comprensión más completa de los mecanismos que impulsan la circulación en esta región.

CAPÍTULO 5

Conclusión

El presente trabajo examinó la respuesta hidrodinámica del golfo de Arauco al paso de ciclones extratropicales sobre Chile central (30-50°S) durante dos estaciones invernales. Para llevar a cabo este estudio, se combinó un modelo de detección de ciclones extratropicales con datos de corrientes en las bocas del golfo de Arauco, específicamente en Boca Chica y Punta Delicada (costado occidental de Boca Grande). Estas ubicaciones son estratégicas para analizar el intercambio de aguas entre este cuerpo de agua semicerrado y el océano exterior.

Los resultados del modelo de seguimiento de ciclones revelaron que la ocurrencia de eventos de viento norte intenso (>9 m/s) sobre el golfo de Arauco se debe en principal medida debido al paso de estos sistemas sobre la región. Adicionalmente se observó que la frecuencia de los ciclones extratropicales ha disminuido progresivamente desde 1979 hasta 2020.

El comportamiento promedio invernal de las corrientes en ambas ubicaciones evidenciaron un comportamiento bidireccional a lo largo de la columna de agua sobre un eje bien establecido. Mientras en Boca Chica el predominio es en una dirección este-oeste, en Punta Delicada se observa una concentración del flujo en un eje noroeste a sureste. Estas zonas presentan un régimen de marea mixto con dominancia semidiurna, sin embargo, las corrientes mareales representan menos del 20 % de la varianza en Punta Delicada y menos del 40 % en Boca Chica.

El análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) de las corrientes submareales en BC reveló un comportamiento principalmente barotrópico (>80 % de la varianza submareal) en ambos periodos. Las correlaciones entre este primer modo y la componente meridional del viento arrojaron valores significativos superiores a 0.5 durante los dos periodos analizados. Las ondeletas de coherencia, por su parte, resaltaron que esta relación se intensifica durante los periodos en que un ciclón extratropical atraviesa la zona. Esta relación se evidencia en el análisis por casos, donde las corrientes exhibieron un flujo de salida barotrópica, con magnitudes entre 10 a 30 cm/s durante la ocurrencia del viento norte intenso.

En contraste, el análisis de EOF sobre las corrientes en PD concentran la mayor parte de la variabilidad en una componente barotrópica (59-78 % de la varianza total) y una

baroclínica (26-13 % de la varianza total). Las correlaciones máximas entre la componente meridional del viento y estos modos se presentaron con desfases entre 19 y 23 horas para el modo barotrópico y entre 4 y 5 horas para el modo baroclínico. Al igual que en BC, las ondeletas de coherencia presentaron máximos durante el paso de ciclones sobre la región. Estos resultados, sumado a lo observado durante los estudios por casos, indican que la respuesta al paso de ciclones es inicialmente de doble capa con una entrada de agua al golfo en la capa superficial y una salida de agua en las capas medias a profundas. Tras alcanzar la intensidad máxima del viento, las corrientes adoptan un comportamiento barotrópico, orientándose hacia el exterior del golfo.

Por último, este trabajo sugiere que el mecanismo que genera este tipo de respuesta al viento generado por ciclones extratropicales es inicialmente un arrastre superficial hacia la cabecera del golfo. Esta acumulación de agua en la cabecera crea un gradiente de presión que impulsa la salida de agua por la boca Chica y, simultáneamente, promueve la salida del agua de las capas más profundas de la boca Grande. Una vez que el viento disminuye en magnitud, las corrientes superficiales de PD replican el comportamiento observado en las capas subsuperficiales.

En conclusión, este estudio ha arrojado luz sobre la compleja interacción entre los ciclones extratropicales y la dinámica de las corrientes en el golfo de Arauco. Los resultados obtenidos respaldan las hipótesis iniciales, destacando la importancia de los ciclones extratropicales en la configuración invernal de las corrientes submareales de la región. Estos hallazgos no solo enriquecen el conocimiento de la hidrodinámica invernal del golfo, sino que también destacan la complejidad de las interacciones entre la atmósfera y el océano. Esta interrelación adquiere relevancia adicional en el contexto del cambio climático y las transformaciones que conlleva, resaltando la importancia de profundizar en estos aspectos para anticipar y entender futuras dinámicas oceánicas.

Bibliografía

- Aguirre , C., Flores-Aqueveque , V., Vilches , P., Vásquez , A., Rutllant , J. A., y Garreaud , R. Recent changes in the low-level jet along the subtropical west coast of South America. *Atmosphere*, 12(4):465, 2021.
- Aguirre , C., García-Loyola , S., Testa , G., Silva , D., y Farías , L. Insight into anthropogenic forcing on coastal upwelling off south-central Chile. *Elem Sci Anth*, 6:59, 2018.
- Ahumada , R., Rudolph , A., y Martinez , V. Circulation and fertility of waters in Concepción Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 16(1):95–105, 1983.
- Barrett , B. S., Garreaud , R., y Falvey , M. Effect of the Andes Cordillera on precipitation from a midlatitude cold front. *Monthly Weather Review*, 137(9):3092–3109, 2009.
- Barrett , B. S., Krieger , D. B., y Barlow , C. P. Multiday circulation and precipitation climatology during winter rain events of differing intensities in central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5):1071–1085, 2011.
- Barton , E. D., Largier , J., Torres , R., Sheridan , M., Trasviña , A., Souza , A., Pazos , Y., y Valle-Levinson , A. Coastal upwelling and downwelling forcing of circulation in a semi-enclosed bay: Ria de Vigo. *Progress in Oceanography*, 134:173–189, 2015.
- Befort , D. J., Wild , S., Knight , J. R., Lockwood , J. F., Thornton , H. E., Hermanson , L., Bett , P. E., Weisheimer , A., y Leckebusch , G. C. Seasonal forecast skill for extratropical cyclones and windstorms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(718):92–104, 2019.
- Bitencourt , D. P., Manoel , G., Acevedo , O. C., Fuentes , M. V., Muza , M. N., Rodrigues , M. L., y Leal Quadro , M. F. Relating winds along the southern brazilian coast to extratropical cyclones. *Meteorological Applications*, 18(2):223–229, 2011.
- Crespo , N. M., Reboita , M. S., Gozzo , L. F., de Jesus , E. M., Torres-Alavez , J. A., Lagos-Zúñiga , M. Á., Torrez-Rodriguez , L., Reale , M., y da Rocha , R. P. Assessment of the RegCM4-CORDEX-CORE performance in simulating cyclones affecting the western coast of South America. *Climate Dynamics*, págs. 1–13, 2022.
- Cruz , E. R., Nolasco , R., Padin , X. A., Gilcoto , M., Babarro , J. M., Dubert , J., y Pérez , F. F. A High-Resolution modeling study of the circulation patterns at a coastal embayment: Ría de Pontevedra (NW Spain) under upwelling and downwelling conditions. *Frontiers in Marine Science*, pág. 792, 2021.
- Daneri , G., Dellarossa , V., Quiñones , R., Jacob , B., Montero , P., y Ulloa , O. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Marine Ecology Progress Series*, 197:41–49, 2000.

- Djurfeldt , L. Circulation and mixing in a coastal upwelling embayment; Gulf of Arauco, Chile. *Continental Shelf Research*, 9(11):1003–1016, 1989.
- Domingues , R., Kuwano-Yoshida , A., Chardon-Maldonado , P., Todd , R. E., Halliwell , G., Kim , H.-S., Lin , I.-I., Sato , K., Narazaki , T., Shay , L. K., et al. Ocean observations in support of studies and forecasts of tropical and extratropical cyclones. *Frontiers in Marine Science*, 6:446, 2019.
- Du , J., Park , K., Shen , J., Dzwonkowski , B., Yu , X., y Yoon , B. I. Role of baroclinic processes on flushing characteristics in a highly stratified estuarine system, Mobile Bay, Alabama. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(7):4518–4537, 2018.
- Du , J. y Shen , J. Water residence time in Chesapeake Bay for 1980–2012. *Journal of Marine Systems*, 164:101–111, 2016.
- Ekman , V. W. On the influence of the earth’s rotation on ocean currents. 1905.
- Emery , W. J. y Thomson , R. E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier, 2001.
- Falvey , M. y Garreaud , R. Wintertime precipitation episodes in central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2):171–193, 2007.
- Faundez-Baez , P., Morales , C., y Arcos , D. Variabilidad espacial y temporal en la hidrografía invernal del sistema de bahías frente a la VIII región (Chile centro-sur). *Revista Chilena de Historia Natural*, 74:817–831, 2001.
- García-Reyes , M. y Largier , J. Seasonality of coastal upwelling off central and northern California: New insights, including temporal and spatial variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C3), 2012.
- Garreaud , R. Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5):1515–1534, 2013.
- Gómez , M., Mäll , M., y Aránguiz , R. The role of physical parameterization schemes in capturing the characteristics of extratropical cyclones over the South Pacific Ocean. *Earth and Space Science*, 8(12):e2021EA001744, 2021.
- Grinsted , A., Moore , J. C., y Jevrejeva , S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6):561–566, 2004.
- Guéry , L., Descamps , S., Hodges , K. I., Pradel , R., Moe , B., Hanssen , S. A., Erikstad , K. E., Gabrielsen , G. W., Gilchrist , H., Jenouvrier , S., et al. Winter extratropical cyclone influence on seabird survival: variation between and within common eider *Somateria mollissima* populations. *Marine Ecology Progress Series*, 627:155–170, 2019.
- Halldor , B. y Venegas , S. A. A manual for EOF and SVD analyses of climate data. *McGill University, CCGCR Report*, 52, 1997.

- Hersbach , H., Bell , B., Berrisford , P., Hirahara , S., Horányi , A., Muñoz-Sabater , J., Nicolas , J., Peubey , C., Radu , R., Schepers , D., Simmons , A., Soci , C., Abdalla , S., Abellan , X., Balsamo , G., Bechtold , P., Biavati , G., Bidlot , J., Bonavita , M., Chiara , G., Dahlgren , P., Dee , D., Diamantakis , M., Dragani , R., Flemming , J., Forbes , R., Fuentes , M., Geer , A., Haimberger , L., Healy , S., Hogan , R. J., Hólm , E., Janisková , M., Keeley , S., Laloyaux , P., Lopez , P., Lupu , C., Radnoti , G., Rosnay , P., Rozum , I., Vamborg , F., Villaume , S., y Thépaut , J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049, 2020. doi:10.1002/qj.3803.
- Holon SpA . Actualización de la información disponible y propuesta de monitoreo para el diseño de la norma secundaria de calidad ambiental para el golfo de Arauco. Informe técnico, Holon SpA, 2020. URL <https://pras.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/08/10-Accion-Informe-Final.pdf>.
- Holton , J. R. An introduction to dynamic meteorology. *American Journal of Physics*, 41(5):752–754, 1973.
- Largier , J. L. Upwelling bays: how coastal upwelling controls circulation, habitat, and productivity in bays. *Annual Review of Marine Science*, 12:415–447, 2020.
- Lellouche , J.-M., Greiner , E., Le Galloudec , O., Garric , G., Regnier , C., Drevillon , M., Benkiran , M., Testut , C.-E., Bourdalle-Badie , R., Gasparin , F., et al. Recent updates to the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12 high-resolution system. *Ocean Science*, 14(5):1093–1126, 2018.
- Letelier , J., Pizarro , O., y Nuñez , S. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C12), 2009.
- Mardones , P., Wong , Z., Contreras-Rojas , J., Muñoz , R., Hernández-Miranda , E., y Sobarzo , M. Upwelling Shadows Driven by the Low-Level Jet Along the Subtropical West Coast of South America: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(8):e2021JC017979, 2022.
- Marín , V. H., Delgado , L. E., y Escribano , R. Upwelling shadows at Mejillones Bay (northern Chilean coast): a remote sensing in situ analysis. *Investigaciones Marinas*, 31(2):47–55, 2003.
- Mendes , D., Souza , E. P., Marengo , J. A., y Mendes , M. C. Climatology of extratropical cyclones over the South American–southern oceans sector. *Theoretical and applied climatology*, 100:239–250, 2010.
- Montero , P., Daneri , G., Cuevas , L. A., González , H. E., Jacob , B., Lizárraga , L., y Menschel , E. Productivity cycles in the coastal upwelling area off Concepción: the importance of diatoms and bacterioplankton in the organic carbon flux. *Progress in Oceanography*, 75(3):518–530, 2007.

- Paduan , J. D., Cook , M. S., y Tapia , V. M. Patterns of upwelling and relaxation around Monterey Bay based on long-term observations of surface currents from high frequency radar. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 151:129–136, 2018.
- Papritz , L., Pfahl , S., Rudeva , I., Simmonds , I., Sodemann , H., y Wernli , H. The role of extratropical cyclones and fronts for Southern Ocean freshwater fluxes. *Journal of Climate*, 27(16):6205–6224, 2014.
- Parada , C. E., Sobarzo , M. A., Figueroa , D., y Castro , L. Circulación del Golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Investigaciones marinas*, 29(1):11–23, 2001.
- Parise , C. K., Calliari , L. J., y Krusche , N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57:175–188, 2009.
- Pawlowicz , R., Beardsley , B., y Lentz , S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8):929–937, 2002.
- Rahn , D. A. y Garreaud , R. D. A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of South America. *International Journal of Climatology*, 34(3):780–792, 2014.
- Saavedra , N. y Foppiano , A. Monthly mean pressure model for Chile. *International Journal of Climatology*, 12(5):469–480, 1992.
- Simmonds , I. y Keay , K. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP–NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 13(5):873–885, 2000.
- Sobarzo , M., Figueroa , M., y Djurfeldt , L. Upwelling of subsurface water into the rim of the Biobio submarine canyon as a response to surface winds. *Continental Shelf Research*, 21(3):279–299, 2001.
- Sobarzo , M., Bravo , L., Donoso , D., Garcés-Vargas , J., y Schneider , W. Coastal upwelling and seasonal cycles that influence the water column over the continental shelf off central Chile. *Progress in Oceanography*, 75(3):363–382, 2007.
- Sobarzo , M., Saldías , G. S., Tapia , F. J., Bravo , L., Moffat , C., y Largier , J. L. On subsurface cooling associated with the Biobio River Canyon (Chile). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7):4568–4584, 2016.
- Sobarzo , M., Soto-Riquelme , C., Flores , R. P., y Saldías , G. S. Synoptic Flow Variability in a River-Influenced Inner Shelf off Central Chile. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4):501, 2022.
- Strub , T., J. , M., V. , M., J. , R., y S. , S. Coastal ocean circulation off western South America, Coastal Segment (6,e). *The Global Coastal Ocean-Regional Studies and Syntheses*, 11:273, 1998.

- Ulbrich , U., Leckebusch , G. C., y Pinto , J. G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theoretical and applied climatology*, 96:117–131, 2009.
- Valle-Levinson , A., Atkinson , L. P., Figueroa , D., y Castro , L. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C2), 2003.
- Vergara , O. A., Echevin , V., Sobarzo , M., Sepúlveda , H., Castro , L., y Soto-Mendoza , S. Impacts of the freshwater discharge on hydrodynamical patterns in the Gulf of Arauco (central-southern Chile) using a high-resolution circulation model. *Journal of Marine Systems*, 240:103862, 2023.
- Viale , M. y Nuñez , M. N. Climatology of winter orographic precipitation over the subtropical central andes and associated synoptic and regional characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4):481–507, 2011.
- Wong , Z., Saldías , G. S., Largier , J. L., Strub , P. T., y Sobarzo , M. Surface thermal structure and variability of upwelling shadows in the Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(4):e2020JC016194, 2021.

