



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

# INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS AL INTERIOR DEL GOLFO DE ARAUCO

Por: Catalina Stephanie Peñailillo Azócar

Junio 2023

Concepción, Chile

## Profesores Guía

Dr. Andrés Sepúlveda Allende

Dra. Odette Vergara

## Comisión revisadora

Dra. Carolina Parada

## AGRADECIMIENTOS

Una de las cosas más importantes al estudiar, fue la tranquilidad de saber que tenía el apoyo de muchas personas, principalmente el de mi familia. Agradezco enormemente el esfuerzo de mis padres, Flor y Robert, que siempre me han dado ánimos para desafiar mis límites y han confiado en mí más de lo que yo he hecho. Gracias a mi mamá, por siempre preocuparse hasta del más mínimo detalle, por pensar en lo que necesito y en lo que podría necesitar, por hacer que todo salga más que bien, que salga perfecto. Gracias a mi papá, por asegurarse de que nunca me faltara nada, por darme esas palabras de aliento y esos empujoncitos que tanto me hacían falta en momentos críticos. Sin duda es gracias a ustedes he logrado ser quien soy y he podido avanzar hasta acá. Son mi modelo a seguir y me llena de orgullo ser su hija.

Gracias a mis amigos, sobretodo a mi mejor amiga, Isidora, que ha estado conmigo casi toda la vida, me ha escuchado y me ha comprendido mejor que nadie, apoyándome siempre en todo sin importar cuantas veces cambie mi rumbo. Gracias a mi pareja, Daniel, que ha visto de cerca todo el camino desde el primer año hasta el final de la carrera, acompañándome en los mejores y peores momentos, apoyándonos y animándonos mutuamente. Gracias a todos quienes han sido mis compañeros por la buena onda, por ser amables, por ser unidos y formar un ambiente tan sano y agradable, gracias a todos ustedes por darme las ganas de seguir esforzándome, por crear esas instancias de trabajo duro pero también momentos de relajación que tanto hacen falta a mitad de semestre.

A todos los profesores del DGEO, gracias por su paciencia, su comprensión y por su contribución a mi desarrollo. Muchas gracias en especial al profesor Andrés Sepúlveda, que me guió en este trabajo en cada paso, que me propuso desafíos y me enseñó lo que necesitaba, que ha confiado en mis habilidades y me ha apoyado inmensamente en el ámbito profesional y académico. Muchas gracias a la profesora Carolina Parada, quien en su momento contribuyó a la elección de mi tema de tesis. Y muchas gracias a Odette Vergara, quien me facilitó las salidas de su modelo, pero que además se ha mostrado siempre dispuesta a ayudarme y aconsejarme en mi trabajo desde que comenzamos a trabajar juntas, gracias por las vibras positivas que me animaron mucho cuando llegué a sentir el cansancio. Los admiro y estimo mucho, por su profesionalidad y calidad humana.

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02). Por el FONDECYT Regular 1211230 adjudicado a HHS y el FONDECYT de Postdoctorado 3190760 adjudicado a OV. Se agradece también la participación del Dr. Vincent Echevin (IRD, Francia). Se agradece también a las instituciones que facilitaron los datos que se utilizaron para la validación de las simulaciones: el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), Fondo de Investigación Pesquera (FIP), el Laboratorio de Oceanografía Pesquera y Ecología Larval (LOPEL) y el Laboratorio de Oceanografía Física Costera (LOFC).

## Resumen

El Golfo de Arauco es una de las bahías más importantes de Chile a nivel económico, siendo una fuente importante de recursos. Su circulación está forzada principalmente por la marea y el viento. Debido a la forma de la bahía, las características de la zona y la época del año, ocurren diversas variaciones en los vientos. Estas variaciones provocan diferencias en la circulación, temperatura, salinidad y en el oleaje dentro del golfo. La importancia del viento es evidente en la física de esta bahía, por lo tanto, toda partícula que se encuentre sumergida en esta zona tendrá un movimiento que también puede variar debido al viento. La contaminación del océano se ha vuelto un tema alarmante en el último tiempo, afectando negativamente el entorno, donde diversos tipos de contaminantes son vertidos constantemente. Esta situación motivó el experimento realizado en este estudio. Usando el modelo oceánico CROCO, se realizaron dos simulaciones anidadas, una con viento y otra sin viento. Simularon durante los meses de enero y febrero de 2013 y se simuló la trayectoria de partículas usando OpenDrift. Al quitar el viento, la temperatura aumentó en todo el dominio llegando hasta 3°C más que en la simulación con viento. La salinidad disminuyó dentro y las corrientes se debilitaron y adoptaron direcciones erráticas. La simulación con viento fue forzada con datos ASCAT con estrés del viento muy fuerte, al igual que la simulación padre, por lo tanto, presenta una fuerte surgencia. En cuanto a las partículas, debido a que el viento dentro del golfo fuerza una corriente en promedio hacia el norte, las partículas demoraban alrededor de dos semanas en salir del dominio (en 3 de los 4 puntos evaluados). Cuando se quitó el viento, la mayoría de las partículas permanecieron dentro del dominio dando vueltas en círculos durante los dos meses de simulación. Con esos resultados se concluyó que el viento tiene gran impacto en el movimiento de las partículas al interior del golfo, donde fuerza corrientes hacia el norte del dominio facilitando su evacuación. Sin el viento, las corrientes serían forzadas principalmente por la marea, gradientes de presión, la descarga del río Biobío y cambios de temperatura. Esto produce una disminución de la magnitud de las corrientes y mantiene las partículas al interior del golfo. En estudios futuros se buscará tener un ambiente y partículas más realistas para poder representar distintos tipos de contaminantes y evaluar sus trayectorias.

# Índice general

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Golfo de Arauco . . . . .	2
1.2. Vientos y circulación en el Golfo de Arauco . . . . .	4
1.3. Río Biobío . . . . .	5
1.4. Contaminación por materia fecal humana . . . . .	7
1.5. Simulaciones en el Golfo de Arauco . . . . .	9
1.6. Objetivos . . . . .	10
1.6.1. Objetivo general . . . . .	10
1.6.2. Objetivos específicos . . . . .	10
<b>2. Metodología</b>	<b>11</b>
2.1. Coastal and Regional Ocean Community Model (CROCO) . . . . .	11
2.2. OpenDrift . . . . .	15
2.3. Dominio grande . . . . .	16
2.4. Zona de estudio . . . . .	18
2.5. Encadenamiento (Anidado Offline) . . . . .	20
2.6. Configuración de la simulación y liberación de partículas . . . . .	21
2.7. Análisis de mareas con T_TIDE . . . . .	22
<b>3. Resultados</b>	<b>23</b>
3.1. Variables en superficie . . . . .	24
3.1.1. Temperatura . . . . .	24
3.1.2. Salinidad . . . . .	26
3.1.3. Velocidades . . . . .	27
3.1.4. Nivel del Mar . . . . .	31
3.2. Mareas . . . . .	33
3.3. Transectas . . . . .	36
3.3.1. Validación en Boca Grande . . . . .	36
3.3.2. Comparación de las salidas del modelo en Boca Grande . . . . .	37
3.3.3. Comparación de las salidas del modelo en Boca Chica . . . . .	41
3.4. Perfiles . . . . .	46

---

3.4.1. Temperatura . . . . .	46
3.4.2. Salinidad . . . . .	48
3.5. Histogramas . . . . .	50
3.5.1. Temperatura . . . . .	50
3.5.2. Salinidad . . . . .	51
3.5.3. Velocidades . . . . .	52
3.6. Partículas . . . . .	55
<b>4. Discusión</b>	<b>61</b>
4.1. Datos, literatura y modelo . . . . .	61
4.2. Con viento vs Sin viento . . . . .	63
4.3. ¿Influye el viento? . . . . .	64
<b>5. Conclusión</b>	<b>66</b>
<b>Referencias</b>	<b>68</b>
<b>Apéndices</b>	<b>75</b>
<b>A. Figuras secundarias</b>	<b>75</b>

## Índice de cuadros

2.4.1.Ubicación de los 5 puntos de datos FIP para los años 2009 y 2011 (perfiles) y de datos del SHOA para el año 2014 (serie de tiempo del nivel del mar). . . . .	19
2.4.2.Ubicación de las desembocaduras de los emisarios submarinos Coronel Norte, Coronel Sur, Lota y San Pedro, que se utilizaron para el estudio (Contreras, 2017). . . . .	19
3.2.1.Tabla comparativa de constituyentes M2 y S2 para los datos del SHOA y las salidas del modelo con viento. . . . .	35
3.3.1.Tabla comparativa de valores de salinidad, temperatura y densidad para los datos del 6 de diciembre de Valle-Levinson (Valle-Levinson et al., 2003) (valores extraídos de la Fig. 4 del artículo) y para las salidas de la simulación con viento. Se comparan los valores observados a 10, 20, 30 y 40 metros de profundidad y se calcula la diferencia [Datos–Simulación]. . . . .	37

# Índice de figuras

1.1.1. Batimetría del Golfo de Arauco. Se marcan las isolíneas de la batimetría que usó el modelo para las simulaciones. . . . .	3
2.1.1. Grilla horizontal tipo C. (Arakawa and Lamb, 1977) . . . . .	13
2.1.2. Coordenadas verticales Z (NEMO) y Sigma (ROMS) respectivamente. . . . .	13
2.3.1. Mapa de batimetría del dominio grande. Se marcan con puntos las isolíneas de batimetría. En rojo se marca la zona del dominio anidado ubicado en el Golfo de Arauco. . . . .	16
2.4.1. Mapa de batimetría del Golfo de Arauco. Las ubicaciones de los emisarios submarinos se observan en los puntos rojos 1) Coronel Norte, 2) Coronel Sur, 3) Lota y 4) San Pedro. Con el punto de color negro 'M' se marca la ubicación de los datos SHOA de marea (SHOA, 2014). Con las estrellas en azul se marcan los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 de perfiles de datos FIP del año 2009 (Tapia, 2010). Con las estrellas en magenta se marcan los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 de perfiles de datos FIP del año 2011 (Hidalgo, 2011) (los puntos 1 y 4 se encuentran en la misma ubicación para ambos años). Con las rectas negras se observan las ubicaciones de las transectas T1) Boca Grande, T2) Boca Chica (Valle-Levinson et al., 2003). . . . .	18
3.1.1. Temperatura superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ( $S.V. - C.V.$ ). Las cuatro columnas representan los promedios de temperatura superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie. . . . .	25

3.1.2.Salinidad superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de salinidad superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie. . . . .	26
3.1.3.Velocidad U superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de velocidad U superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie. . . . .	28
3.1.4.Velocidad V superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de velocidad V superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie. . . . .	29
3.1.5.Magnitud de la velocidad superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de magnitud de la velocidad superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie. . . . .	30
3.1.6.Nivel del mar del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de temperatura superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie. . . . .	32
3.2.1.Series de tiempo de marea. En las primeras filas se observan las series de tiempo de nivel del mar y marea astronómica para los datos y el modelo. En la tercera y cuarta fila se observan las diferencias entre las series de tiempo de nivel del mar y marea astronómica [Datos - Modelo]. . . . .	33

3.2.2. Diagrama de frecuencias generado a partir de los datos de marea del SHOA. La gráfica muestra constituyentes significativos y no significativos utilizando un nivel de significancia de 95 %. Se observan los constituyentes significativos por sobre la línea punteada verde y los no significativos por debajo de ella. . . . .	34
3.2.3. Diagrama de frecuencias generado a partir de las salidas del modelo. La gráfica muestra constituyentes significativos y no significativos utilizando un nivel de significancia de 95 %. Se observan los constituyentes significativos por sobre la línea punteada verde y los no significativos por debajo de ella. . . . .	35
3.3.1. Sección vertical de la simulación con viento en Boca Grande. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V). . . . .	38
3.3.2. Sección vertical de la simulación sin viento en Boca Grande. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V). . . . .	39
3.3.3. Diferencia de las simulaciones en Boca Grande. Se muestran las diferencias entre la simulación con viento y sin viento de las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V). . . . .	40
3.3.4. Sección vertical de la simulación con viento en Boca Chica. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V). . . . .	42
3.3.5. Sección vertical de la simulación sin viento en Boca Chica. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V). . . . .	43
3.3.6. Diferencia de las simulaciones en Boca Chica. Se muestran las diferencias entre la simulación con viento y sin viento de las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V). . . . .	44
3.4.1. Perfiles de temperatura en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva roja representa los datos, la curva azul representa las salidas del modelo con viento y la curva verde representa las salidas del modelo sin viento. . . . .	46
3.4.2. Perfiles de diferencia de temperatura en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva magenta representa la diferencia entre los datos y el modelo con viento, la curva cyan representa la diferencia entre los datos y el modelo sin viento. . . . .	47
3.4.3. Perfiles de salinidad en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva roja representa los datos y la curva azul representa las salidas del modelo con viento y la curva verde representa las salidas del modelo sin viento. . . . .	48

3.4.4. Perfiles de diferencia de salinidad en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva magenta representa la diferencia entre los datos y el modelo con viento y la curva cyan representa la diferencia entre los datos y el modelo sin viento. . . . .	49
3.5.1. Distribución de los valores de temperatura en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones. . . . .	50
3.5.2. Distribución de los valores de salinidad en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones. . . . .	52
3.5.3. Distribución de los valores de velocidad U en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones. . . . .	53
3.5.4. Distribución de los valores de velocidad V en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones. . . . .	54
3.6.1. Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario Coronel Norte con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas. . . . .	56
3.6.2. Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario Coronel Sur con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas. . . . .	57
3.6.3. Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario Lota con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas. . . . .	58
3.6.4. Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario San Pedro con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas. . . . .	59
A0.1. Sección vertical en Boca Grande para la fecha del 6 de diciembre del año 2000 (Valle-Levinson et al., 2003). Muestra las variables de salinidad, temperatura, densidad y oxígeno disuelto. . . . .	76

---

A0.2. Sección vertical en Boca Grande para la fecha del 6 de diciembre del año 2000 (Valle-Levinson et al., 2003). Muestra las variables de salinidad, temperatura, densidad y oxígeno disuelto. . . . .	77
A0.3. Histograma de las diferencias de nivel del mar y marea astronómica entre las salidas del modelo y los datos SHOA. . . . .	77

# Capítulo 1

## Introducción

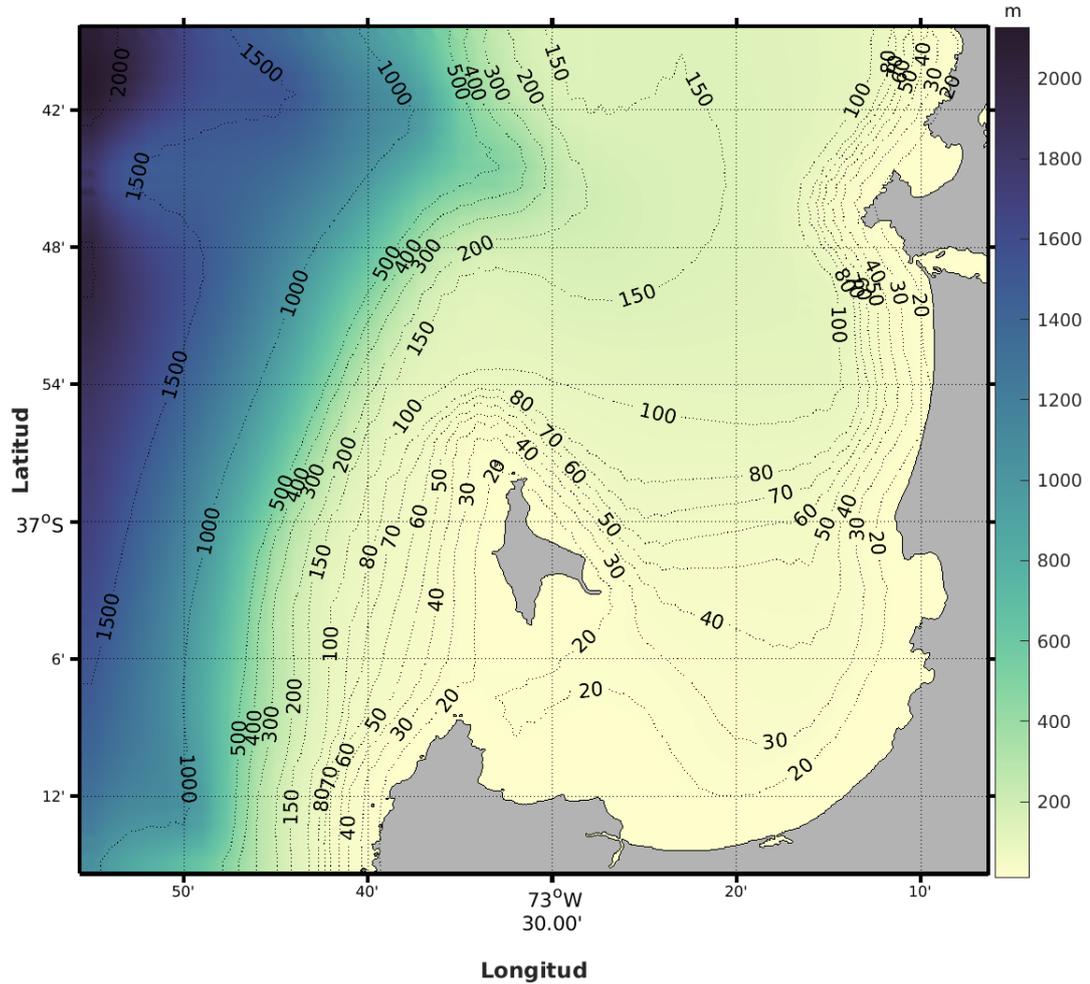
El viento es uno de los principales forzantes de la circulación en la superficie del Golfo de Arauco, provoca eventos de surgencia y hundimiento, lo que también influye en la temperatura superficial del mar. Esta influencia en la física del golfo nos lleva a preguntarnos: ¿qué tan diferente sería el estado de la zona si no estuviera presente el viento? Si cambiara el viento, ¿qué tanto cambiaría la circulación? Si cambia la circulación, ¿habría una diferencia importante en la dispersión de partículas dentro del golfo? Por otro lado, ¿por qué nos importa la dispersión de partículas? En los últimos años, la contaminación antropogénica ha sido un tema preocupante a nivel global, ya que no solo afecta a la flora y fauna de los lugares, sino que directamente está afectando la salud de la población humana. La contaminación en las costas ha ido en aumento debido a la excesiva evacuación de aguas residuales al mar, ya sean de desechos domésticos a través de los emisarios submarinos o desechos industriales (como sustancias químicas y metales pesados), lo que ha encendido alarmas desde 2010 (Peredo Núñez, 2010). Recientemente se ha establecido una concordancia entre el aumento de contaminación fecal humana con brotes de hepatitis A en la población de la zona (González-Saldía et al., 2019). Estos problemas surgen debido al deficiente tratamiento de las aguas residuales que desembocan en los océanos (y muchas veces en fuentes de agua dulce, como en el caso del río Biobío, que desemboca en el Golfo de Arauco). En esta investigación, se pone foco a la importancia del viento en la dispersión de partículas provenientes de emisarios submarinos. En la investigación de González-Saldía et al. (2019) se encuentra una relación temporal y espacial entre la presencia de ADN mitocondrial humano, coliformes fecales y biomasa

microbiana viva en el agua de mar con brotes de hepatitis A en la población costera. En este artículo ([González-Saldía et al., 2019](#)) se deja planteada una duda: ¿el viento influye significativamente en la distribución de estos desechos?, la respuesta no es del todo clara, se sospecha que las fluctuaciones locales del viento afectan en la distribución de la contaminación fecal, ya que son partículas que se mantienen en la superficie, pero ¿en qué medida?. Las simulaciones realizadas en esta investigación buscan comparar dos escenarios, uno en donde se cuente con el forzante del viento en la zona del Golfo de Arauco y otra con la completa ausencia de este, liberar partículas simples (sin las características de un coliforme fecal) desde las posiciones en donde se encuentren los emisarios submarinos de la zona para luego comparar y comprender las diferencias en las trayectorias de ambas simulaciones.

## 1.1. Golfo de Arauco

El Golfo de Arauco, ubicado entre los  $36^{\circ}45'$  y  $37^{\circ}10'S$ , está orientado hacia el Ecuador y es la bahía semicerrada más grande de Chile. Cubre un área de aproximadamente  $40.000 \text{ km}^2$  y tiene una profundidad de cerca de 100 metros máximo, como presenta la batimetría del modelo (Fig. 1.1.1). Hacia el oeste se encuentra la Isla Santa María, la cual forma dos canales: Boca Chica y Boca Grande, con profundidades cercanas a los 20 y 50 metros y con un ancho de aproximadamente 8 y 25 kilómetros respectivamente ([Wong et al., 2021](#)). En esta zona, el mar se caracteriza por una alta productividad biológica, se han observado altos niveles de producción primaria ([Daneri et al., 2000](#)) y es reconocida por ser un sitio de retención de plancton ([Castro et al., 2007](#)), donde además se encuentran grandes cantidades de diversas especies de peces, algas, moluscos y crustáceos, que son la base del ecosistema y de la economía del lugar ([Arrizaga et al., 1991](#)) como la anchoveta en invierno ([Castro et al., 1997](#)) y la cigala y merluza en primavera-verano ([Vargas and Castro, 2001](#); [Yannicelli et al., 2006](#)). Gracias a estas características, una de las principales actividades económicas de la zona es la pesca, que puede llegar a contribuir hasta con un 50% de los desembarques pesqueros anuales en Chile y hasta con un 4% en el mundo ([Daneri et al., 2000](#)).

## Batimetría del Golfo de Arauco



**Figura 1.1.1:** Batimetría del Golfo de Arauco. Se marcan las isolíneas de la batimetría que usó el modelo para las simulaciones.

La dinámica de esta bahía está regulada principalmente por la marea y el viento (Parada et al., 2001), y por otro lado, el oleaje es suavizado por la Isla Santa María (Gómez et al., 2018). En términos generales, al interior del Golfo de Arauco tenemos temperatura del aire cercana a 13<sup>o</sup> y 15<sup>o</sup>C, en la superficie del mar encontramos temperaturas entre los 11<sup>o</sup> y 15<sup>o</sup>C (Valle-Levinson et al., 2003), una densidad sigma-t cercana o superior a los 26 kg/m<sup>3</sup> y una salinidad que va desde los 34 a 34.5 PSU (Castillo Pizarro et al., 1996), que no presenta grandes variaciones en verano debido a la baja descarga de agua dulce del Río Biobío en esa época del año (cerca de los 200 m<sup>3</sup>/s) (Valle-Levinson et al., 2003).

## 1.2. Vientos y circulación en el Golfo de Arauco

Los principales forzantes impulsores de la circulación dentro del Golfo de Arauco son la marea y el viento (Parada et al., 2001; Valle-Levinson et al., 2003). Este último, junto con la isla Santa María, juega un rol clave en la propagación del oleaje dentro del golfo (Villagrán et al., 2022). El viento en esta zona muestra fluctuaciones diurnas bien definidas, alcanzando su máxima intensidad en la puesta del sol (Valle-Levinson et al., 2003; Yannicelli et al., 2006), presentando variabilidad semestral y sinóptica (Parada et al., 2001; Wong et al., 2021; Mardones et al., 2022). En los periodos de primavera-verano (entre septiembre y marzo), predominan los vientos desde el sur y suroeste, generando una circulación antihoraria dentro del golfo y favoreciendo a la surgencia (Parada et al., 2001; Yannicelli et al., 2006), proceso en el cual asciende agua fría ( $<12^{\circ}\text{C}$ ), alta en salinidad ( $>34.5$  PSU), baja en oxígeno y rica en nutrientes, propias del Agua Ecuatorial Subsuperficial (Silva et al., 2009; Fuenzalida et al., 2009; Ulloa and Pantoja, 2009; Hernández-Miranda et al., 2010), que favorecen la producción primaria de la zona costera (Leth and Middleton, 2004). En los periodos de otoño-invierno (entre mayo y julio), predominan los vientos desde el norte y noroeste, que provocan una circulación horaria dentro del golfo, favorable al hundimiento (Parada et al., 2001). En los periodos de transición (destacando los meses de abril y agosto) y de relajación de surgencia, donde ocurren cambios de viento sur-suroeste a viento norte o viceversa, se produce una doble capa con rotación superficial horaria y subsuperficial antihoraria (Parada et al., 2001).

El viento también gobierna la estacionalidad del calor latente (o evaporativo) (Garcés-Vargas and Abarca-del Río, 2012) y es un factor que influye en el flujo de calor sensible entre el océano y la atmósfera. Habrá mayor flujo si hay mayor diferencia de temperatura entre ambos medios y/o mayor intensidad del viento y habrá más evaporación de agua con vientos más intensos y aire más seco (Stewart, 2008; Talley, 2011). Ocurren cambios en la temperatura con relajaciones de los vientos de surgencia, donde se produce un enfriamiento de la superficie, por otro lado, una inversión de los vientos ayuda al calentamiento de esta (Wong Chang et al., 2022). Debido a la forma geográfica del Golfo de Arauco, se producen las sombras de surgencia (Mardones et al., 2022). Estas se observan como una zona de agua cálida que se ubica entre la costa y el agua fría provocada por la surgencia.

Esta zona existe debido a que es un área que está más protegida del viento proveniente del sur, por lo que se produce con más frecuencia en primavera-verano y con un rotor negativo (ciclónico) del estrés del viento (Wong Chang et al., 2022).

En el Golfo de Arauco, el viento influencia la variabilidad de la corriente por sobre los  $\sim 130$  metros de profundidad, en capas más profundas dominan las ondas atrapadas a la costa (OAC) (Leth and Middleton, 2006). Estas son ondas geofísicas afectadas por la rotación de la Tierra y por la estratificación del océano. Propagan la energía a lo largo de la costa y principalmente afectan la distribución de densidad en las capas bajo la superficie. Las variaciones de fase de estas ondas pueden afectar las características de la surgencia y a su vez, la productividad biológica (Pizarro Arraigada, 2016).

El viento influye de manera importante en la circulación, y de la misma manera, es un factor que se ve influenciado por fenómenos de mayor escala y por las características geográficas de la zona. El anticiclón del Pacífico sur y el paso de anticiclones migratorios provocan variabilidad en los patrones de viento (Garreaud et al., 2002; Renault et al., 2012; Rahn and Garreaud, 2014; Ancapichún and Garcés-Vargas, 2015). Estos cambios en el viento afectan también el régimen de oleaje dentro del golfo (Villagrán et al., 2022). La forma de la costa, donde cambia de dirección en Punta Lavapié, también afecta el campo de viento, y como ya se mencionó, esto provoca las sombras de surgencia al tener una determinada forma que protege del viento cierta zona de la bahía. La cordillera de los Andes provoca variaciones en los vientos que terminan por fortalecer el chorro costero, y a su vez, intensifican la surgencia (Rahn and Garreaud, 2014; Aguirre et al., 2019). También provoca un descenso de aire que se calienta adiabáticamente, lo que aporta al aumento de la temperatura superficial del golfo y permite cielos despejados, que intensifican la sombra de surgencia (Wong Chang et al., 2022).

### 1.3. Río Biobío

La cuenca del río Biobío se encuentra en la zona central de Chile, en la VIII Región. Se ubica entre los  $36^{\circ}45'$  y  $38^{\circ}20'S$  y entre los  $71^{\circ}15'$  y  $73^{\circ}09'W$  aproximadamente. El río nace en los lagos Icalma y Galletue, desde la cordillera de los Andes, fluye a través de bosques, ciudades y áreas industriales, recorriendo cerca de 380 kilómetros para desembocar en el Golfo de Arauco, siendo así el segundo río más

largo de Chile y el tercero con mayor superficie, cifra que bordea los 24260 km<sup>2</sup> (Parra et al., 2013). Su caudal va de entre los 120 a 300 m<sup>3</sup>/s en verano (Valdovinos and Parra, 2006) y en invierno desde los 900 a 1943 m<sup>3</sup>/s (Valdovinos and Parra, 2006; Parra et al., 2009). El río Biobío contiene la mayor riqueza de especies de las cuencas de agua dulce en Chile, contando con muchas especies nativas y otras introducidas. Tiene una variedad de peces como el bagre grande (*Nematogenys inermis*), Carmelita de Concepción (*Percilla irwini*), carpa (*Cyprinus carpio*), trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), entre otros. También se pueden encontrar diversas especies de moluscos, crustáceos e insectos acuáticos, así como también diferentes tipos de plantas acuáticas (hidrófitas) y plancton (bacterioplancton, fitoplancton y zooplancton) (Valdovinos and Parra, 2006).

Entre los servicios ecosistémicos que caracterizan al río Biobío podemos mencionar: el ser una fuente de agua potable, fuente para uso industrial, para el riego, receptor de desechos industriales, urbanos, generación de energía por medio de hidroeléctricas, piscicultura, pesca, recarga de aguas subterráneas, recreación, turismo (Valdovinos and Parra, 2006) y la silvicultura, que emplea cerca del 30 % de la cuenca del Biobío (Grantham et al., 2013). En consecuencia, se ve afectado enormemente por los desechos, aportados principalmente por las industrias papeleras y de celulosa, las cuales producen más de 1.000 toneladas por día de celulosa de pino y eucalipto en la región, cuyas aguas residuales son vertidas al río (Orrego et al., 2019), al igual que ocurre con las aguas residuales de hidroeléctricas y las aguas servidas de algunos poblados. Es importante también tener en cuenta que los pinos y eucaliptos son árboles con un enorme consumo hídrico, su plantación en masa provoca un déficit hídrico en las zonas donde se ubican, y una de las consecuencias de esto es la disminución de los caudales de las cuencas cercanas en época de verano (Lara et al., 2009; Little et al., 2009). Por otro lado, los contaminantes vertidos causan gran impacto ecológico, degradando la calidad del agua y dañando al entorno biológico, donde se pierden variedad de peces y hay bioacumulación (Grantham et al., 2013; Figueroa et al., 2013; Habit et al., 2006), lo que significa un problema para la población humana misma que se beneficia de recursos como el agua potable y la pesca, que portarán parte de los desechos tóxicos. Es importante conocer el estado del río Biobío, ya que después de su largo recorrido, desemboca en el Golfo de Arauco con un nivel importante de contaminantes, lo que agrava la situación en esta bahía.

## 1.4. Contaminación por materia fecal humana

El foco de esta investigación se centrará en la diferencia entre la trayectoria de partículas cuando hay viento y cuando no. Un tipo de partícula de interés a estudiar es la materia fecal humana, la cual llega mayormente desde emisarios submarinos que vierten aguas residuales urbanas al mar. En esta materia, Chile estuvo catalogado como uno de los dos países con mayor producción de desechos domésticos arrojados al mar, siendo uno de los mayores contaminadores del Pacífico en Sudamérica (Fortt and de Oceana, 2007). Un alto nivel de contaminación hace que beber o tocar estas aguas en mal estado llegue a ser perjudicial para la vida (Peredo Núñez, 2010), tanto humana como marina. Es posible contraer enfermedades a través del consumo de mariscos y pescados (Pucci et al., 2013), ya que, a través de los sedimentos, las comunidades bentónicas acumulan contaminantes, los que son traspasados a sus depredadores, para finalmente ser consumidos por la población (bioacumulación) (Fortt and de Oceana, 2007) causando enfermedades, y a su vez, puede producir la muerte de varios de los organismos acuáticos (Peredo Núñez, 2010). Por otro lado, las bacterias presentes en los coliformes utilizan gran parte del oxígeno disponible, lo que produce una limitación severa de este elemento, afectando en la respiración de peces y otros organismos marinos (Fortt and de Oceana, 2007). En caso de las playas con fines de recreación, aumenta el riesgo de contraer enfermedades infecciosas asociadas con patógenos por contacto directo (Pucci et al., 2013; Braga et al., 2000), donde la exposición a las bacterias patógenas pueden provocar dermatitis, problemas oculares, síntomas gastrointestinales leves y severos (Davies et al., 1995), también se ha estudiado que cuando las concentraciones son mayores a 1000 coliformes fecales por 100 ml, hay un 50 % de probabilidad de encontrar Salmonella sp (Grunnet, 1978), que podría llevar incluso a la hospitalización.

La alta concurrencia a las playas en verano implica un gran riesgo, debido a que los coliformes sobreviven más tiempo cuando están en aguas con temperaturas bajas (Vendrell et al., 1999), como en el caso del mar en Chile. Otro factor importante es el hecho de que los sedimentos costeros recreativos pueden actuar como reservorios de coliformes fecales, ya que sus características influyen en la persistencia de microorganismos (Craig et al., 2002) proporcionando un entorno favorable y sin inanición para las bacterias (Davies et al., 1995), aumentando así su supervivencia

en comparación con el agua ([Craig et al., 2002](#)).

## 1.5. Simulaciones en el Golfo de Arauco

Los modelos oceánicos han sido de mucha utilidad para comprender la física en diferentes regiones del planeta. Una de las ventajas de los modelos es la experimentación que se puede llevar a cabo a la hora de forzarlos. Estos experimentos nos pueden servir para comprender de mejor manera cómo se relacionan algunos fenómenos con la variabilidad de los procesos y variables físicas. Existen estudios que se enfocan en Chile central y dentro de esta zona, el Golfo de Arauco. Utilizando el modelo POM (Princeton Ocean Model) (Mellor, 1998), se ha estudiado la circulación en Chile central y la relación entre la surgencia y la advección de remolinos (Leth and Middleton, 2004). También se hizo un estudio idealizado de la circulación relacionada a las ondas atrapadas a la costa (OAC) (Leth and Middleton, 2006).

El modelo CROCO (Cambon et al., 2022) es muy utilizado también para estudios en Chile central. Se ha estudiado el impacto de las descargas de agua dulce en la circulación al interior del golfo (Vergara et al., 2023), a partir de esta simulación se crearon los dominios anidados analizados en este trabajo. Contreras (2017) realizó un estudio de la circulación en el golfo y se analizaron los patrones de residencia y dispersión de contaminantes provenientes de emisarios submarinos. Se simuló con ROMS AGRIF (Shchepetkin and McWilliams, 2005; Debreu et al., 2008) y se acopló con el modelo de dispersión lagrangiano Ichthyop (Lett et al., 2008). Se liberaron partículas de distintas densidades y se estudió su comportamiento horizontal y verticalmente dentro del golfo. Si bien el trabajo de Contreras (2017) tiene algunas similitudes con esta investigación, la finalidad es distinta. Utilizando CROCO (Cambon et al., 2022) y OpenDrift (Dagestad et al., 2018), se propone un experimento que nos permita cuantificar en qué medida sería el viento un factor importante tanto en la física del golfo como en la trayectoria de las partículas. El estudio se centrará en el movimiento que tengan estas partículas más que en su residencia en las costas. Ya que se entiende que el viento es importante en la dinámica del océano, un cambio significativo (como un viento cero) provocaría un cambio no solo en la magnitud y dirección de las velocidades, sino que en todas las variables físicas que estén relacionadas a los movimientos del océano.

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo general

El objetivo general de este experimento es estudiar la influencia del viento en la deriva de partículas al interior del Golfo de Arauco. Para esto se propone analizar salidas de modelo con dos escenarios, uno realista con el efecto del viento en los forzantes atmosféricos y otro que no tenga viento. De esta manera, se compararían las diferencias en la física y en la trayectoria de partículas para ambas simulaciones.

### 1.6.2. Objetivos específicos

Para estudiar la influencia del viento en el movimiento de las partículas, se establecieron los siguientes objetivos:

1. Realizar un anidado offline enmarcado en el Golfo de Arauco donde se agreguen mareas y ríos y estableciendo los escenarios con viento y sin viento.
2. Estudiar los cambios en la circulación en el Golfo de Arauco bajo los distintos escenarios.
3. Simular la dispersión de partículas desde los emisarios submarinos Coronel Norte ( $36^{\circ}58'45.84''$  S,  $73^{\circ}11'55.32''$ W), Coronel Sur ( $37^{\circ}2'12.84''$ S,  $73^{\circ}9'10.8''$ W ), Lota ( $37^{\circ}4'29.28''$ S,  $73^{\circ}11'2.04''$  W) y San Pedro ( $36^{\circ}50'37.32''$ S,  $73^{\circ}10'18.84''$ W).
4. Analizar el impacto de los distintos forzantes en la trayectoria y posición final de las partículas.

## Capítulo 2

# Metodología

### 2.1. Coastal and Regional Ocean Community Model (CROCO)

Para realizar la simulación en el Golfo de Arauco, se utilizó CROCO, un modelo numérico de circulación oceánica basado en los modelos ROMS AGRIF (Shechepetkin and McWilliams, 2005; Debreu et al., 2008), NEMO (Madec et al., 2017), MARS3D (Lazure and Dumas, 2008) y Symphonie (Marsaleix et al., 2008). Trabaja con las ecuaciones de conservación primitivas: conservación de momentum (ec. 2.1.1), ecuación de advectiva-difusiva (ec. 2.1.2), ecuación de estado (ec. 2.1.3) y la ecuación de continuidad (ec. 2.1.4), donde se utiliza principalmente la aproximación de Boussinesq y la aproximación hidrostática (ec. 2.1.5). El modelo asume que la Tierra rota con una velocidad angular constante. Permite ajustar las condiciones de borde superficiales, de fondo y laterales, utilizando coordenadas horizontales y verticales (modelo 3-D). CROCO es un modelo que considera un balance en la vertical dado entre la aceleración de gravedad y el gradiente de presión. Esto permite trabajar a grandes escalas, como la escala sinóptica y mesoescala usando el modelo hidrostático. Para escalas espaciales más pequeñas (de  $\sim 100\text{m}$  o menos), el programa cuenta con un modelo no hidrostático (Cambon et al., 2022). Las variables básicas que se encuentran en el modelo son la temperatura, salinidad, velocidades geostroficas y profundidad, y de forma auxiliar se pueden obtener otras como la densidad, velocidad vertical, presión, energía cinética, entre otras.

Las principales ecuaciones del modelo son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}u) - fv &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} + \mathcal{F}_u + \mathcal{D}_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}v) + fu &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} + \mathcal{F}_v + \mathcal{D}_v\end{aligned}\quad (2.1.1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}C) = \mathcal{F}_C + \mathcal{D}_C \quad (2.1.2)$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (2.1.3)$$

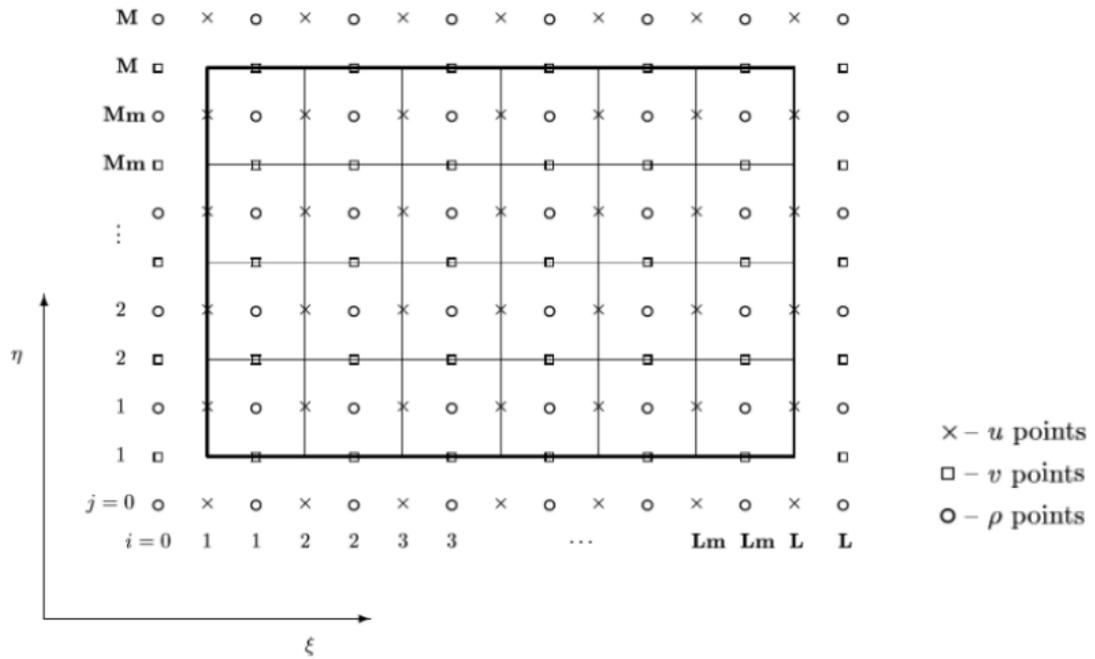
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1.4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (2.1.5)$$

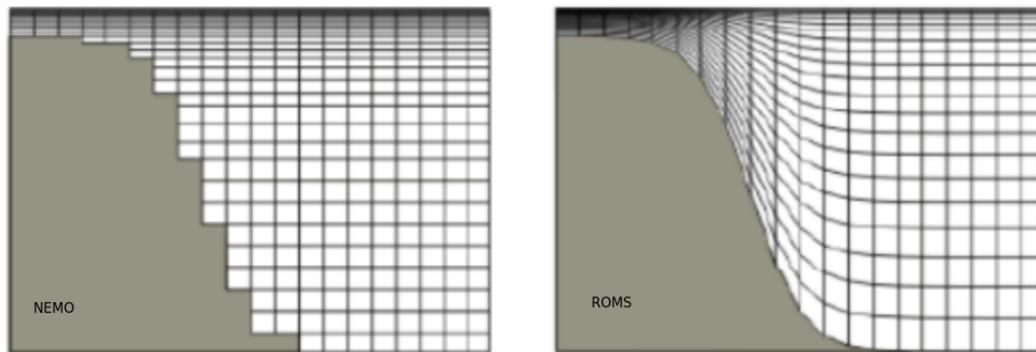
donde:

- $\mathcal{D}_u, \mathcal{D}_v, \mathcal{D}_C$  son los términos difusivos.
- $\mathcal{F}_u, \mathcal{F}_v, \mathcal{F}_C$  son los términos asociados al forzamiento.
- $f(x, y) = 2\Omega \sin \phi$  es el parámetro de Coriolis.
- $g$  es la aceleración de gravedad.
- $\phi(x, y, z, t) = \frac{P}{\rho_0}$  es la presión dinámica con  $P$  como la presión total.
- $\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$  es la densidad total *in situ*.
- $u, v, w$  son las componentes  $(x, y, z)$  del vector de velocidad  $\vec{v}$ .

CROCO se caracteriza por utilizar la grilla horizontal tipo C o Arakawa C (Arakawa and Lamb, 1977), en esta grilla, las velocidades y la densidad se ubican en diferentes puntos y así mismo son calculadas. Las velocidades  $u$  se calculan en los puntos medios horizontales de cada cuadrado y las velocidades  $v$  se calculan en los puntos medios verticales de cada cuadrado, mientras que la densidad es calculada en el punto central de cada cuadrado (Fig. 2.1.1).



**Figura 2.1.1:** Grilla horizontal tipo C. (Arakawa and Lamb, 1977)



**Figura 2.1.2:** Coordenadas verticales  $Z$  (NEMO) y  $\sigma$  (ROMS) respectivamente.

También cuenta con una coordenada vertical que se caracteriza por ser una grilla que sigue la batimetría del terreno, siendo esta es una coordenada híbrida que mezcla la coordenada  $Z$  (modelo NEMO) con la coordenada  $\sigma$  (ROMS), lo que genera una batimetría menos suavizada y por ende, con mejor resolución (Fig. 2.1.2).

El modelo CROCO es uno de los más usados para la modelación oceánica en Chile, además de tener módulos en los cuales se puede aplicar la influencia de los ríos, se puede simular mareas y tiene interacción corriente-oleaje. Es posible hacer diagnósticos online, realizar paralelización, simulaciones interanuales (es decir, simular un periodo de tiempo real y específico del pasado), anidamientos y encadenamientos, siendo esto último nombrado, la base de esta investigación. Gracias a que funciona con diferentes tipos de modelos, como modelos biogeoquímicos (PISCES, NPZD, N2PZD2 y BioEBUS), de partículas o de sedimentos, suele usarse para obtener la base física y/o biológica de un entorno en el mar, información que puede usarse para alimentar modelos atmosféricos, como por ejemplo, el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) (Skamarock et al., 2005). WRF puede aportar información del estado atmosférico de una zona a CROCO y CROCO puede entregar información sobre el estado del océano en superficie a WRF. Se pueden tener los modelos por separado u offline (simulando independientemente el uno del otro), donde se utilizan las salidas de uno de los modelos para crear forzantes necesarios para el otro. También pueden acoplarse, de esta manera se entregan información mutua y simultáneamente, lo que se ha probado para el estudio y seguimiento de ciclones tropicales (Lemarié et al., 2014; Zhao and Chan, 2017; Mooney et al., 2019). También se puede utilizar para modelos de seguimiento de partículas, como lo es OpenDrift [2.2]. Existen varios estudios donde utilizan la física de CROCO para estudiar diversos tipos de partículas, como minerales, ADN ambiental, transporte de larvas, búsqueda y rescate (Staalstrøm et al., 2017; Dugstad et al., 2019; Andruszkiewicz et al., 2019; Clavel-Henry et al., 2021; Putri et al., 2022), entre muchos otros.

## 2.2. OpenDrift

Para analizar el movimiento de partículas descargadas por los emisarios, se utilizará OpenDrift (Dagestad et al., 2018), un modelo de código abierto basado en Python. OpenDrift es un paquete de software utilizado para modelar de manera offline las trayectorias de diversos tipos de objetos y sustancias a la deriva, tanto en el océano como en la atmósfera. Este puede acoplarse a muchos modelos, incluyendo al modelo CROCO, ya que necesita principalmente datos de corriente, viento y olas, variables básicas para el funcionamiento de cualquier modelo oceánicos, puede adecuarse a cualquier proyección de mapa y sus salidas se guardan en archivos NetCDF. Puede simular el transporte de una variedad de tipos de partículas, como puede ser la deriva de petróleo (Jones et al., 2016), microplásticos (Gérigny et al., 2022), transporte de huevos y larvas de peces (Crivellaro et al., 2022), barcos, modelos de búsqueda y rescate, icebergs, entre muchos otros usos. El modelo es capaz de simular hacia atrás en el tiempo (con un paso de tiempo negativo), opción que permite encontrar una posible trayectoria para partículas que ya están en un punto.

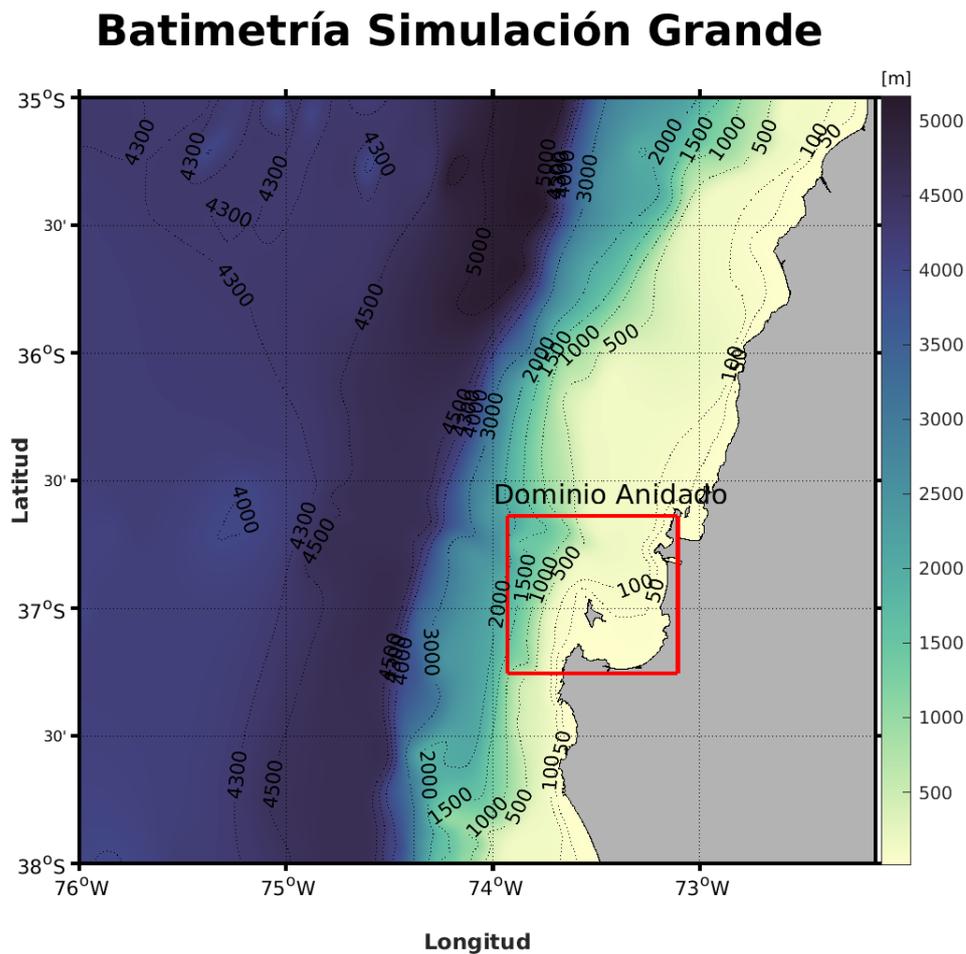
El diseño de OpenDrift se centra en 6 puntos principales;

1. Instalación y uso simple e independencia de plataforma;
2. Implementación simple, rápida y flexibilidad en caso de imprevistos;
3. Forzar datos de cualquier tipo de fuente admitida (como archivos NetCDF o GRIB), mediciones *in situ*, conjuntos de datos vectoriales (como líneas costeras GSHHS) o campos analíticos para estudios conceptuales;
4. Rapidez de cálculo aún con una gran cantidad de elementos;
5. Simulaciones hacia adelante y hacia atrás en el tiempo;
6. Robustez para uso operativo. Estas características lo vuelven un modelo bastante rápido, dinámico y amigable para los usuarios, lo que le permite ser utilizado para objetivos muy diversos.

En este proyecto, se utilizará una forma básica y simple de código para simular la deriva de partículas para ambos casos (con viento y sin viento) y observar la diferencia entre las trayectorias en ambos casos.

## 2.3. Dominio grande

Las simulaciones que se utilizaron en esta investigación, se crearon a partir del modelo de Vergara et al. (2023), se realizaron dos simulaciones anidadas (o encadenadas) enmarcadas en el Golfo de Arauco [2.5]. La simulación grande abarca la zona entre los 35°-38°S y 69°-76°W (Fig. 2.3.1), tiene una resolución de 2.5 km y cuenta con 50 niveles verticales. Es una simulación interanual que va desde el 1 de enero de 2013 al 31 de diciembre de 2018 con salidas diarias. En esta sección se explicará brevemente la configuración de la simulación grande (Vergara et al., 2023), los datos que se utilizaron para crear los forzantes, los datos que se utilizaron para validar la simulación y se mencionarán los resultados más relevantes obtenidos a partir de esta investigación.



**Figura 2.3.1:** Mapa de batimetría del dominio grande. Se marcan con puntos las isolíneas de batimetría. En rojo se marca la zona del dominio anidado ubicado en el Golfo de Arauco.

Para la topografía se utilizaron datos GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean <sup>1</sup>), las condiciones de borde se obtuvieron a partir del modelo MERCATOR-OCEAN (Lellouche et al., 2018) <sup>2</sup> con una resolución de  $1/12^{\circ}$  y para el forzamiento atmosférico se utilizaron datos de viento ASCAT y parámetros de aire de ERA-Interim (Dee et al., 2011). Se añadieron las descargas mensuales e interanuales de los ríos Mataquito (35°S), Maule (35.4°S), Itata (36.4°S) y Biobío (36.8°S), datos obtenidos de la Dirección General de Aguas (DGA<sup>3</sup>), y se estableció una salinidad de 10 PSU y una temperatura de 12°C en las desembocaduras de estos (no se añadió el efecto de mareas en las simulaciones). Los objetivos de esta investigación se centraban en caracterizar la hidrodinámica dentro y alrededor del Golfo de Arauco y estudiar el impacto de las descargas de los ríos en la circulación e hidrografía de este.

Para la validación de las variables de temperatura y salinidad de la simulación, se utilizaron datos *in situ* de cruceros realizados por el LOPEL (Laboratorio de Oceanografía Pesquera y Ecología Larval<sup>4</sup>). Se evaluaron series de tiempo de temperatura a 2, 5 y 10 metros de profundidad, con datos diarios de la cadena de termistores de Onset Computer Corp. (Estados Unidos), y las corrientes con datos de ADCP, proporcionados por el LOFC (Laboratorio de Oceanografía Física Costera). Los resultados se mostraron positivos, la temperatura y salinidad coincidieron en gran medida con los datos *in situ* de crucero, las masas de agua, series de tiempo de temperatura y corrientes fueron bien representadas por el modelo.

Algunos resultados que se obtuvieron en esta investigación mostraron que efectivamente, el río Biobío (que muestra el caudal más alto de todos los ríos considerados en el estudio) impactó fuertemente la circulación del Golfo de Arauco. Provoca una intensificación de las corrientes y disminuye enormemente la salinidad. Se concluyó que el área de influencia del río está relacionada con la fuerza de descarga de este (Vergara et al., 2023). Estos resultados se vuelven relevantes a la hora de decidir si agregar o no la influencia de ríos en el modelo para la deriva de partículas, ya que se demuestra que influye en las corrientes y de la misma manera, influirá en cómo se moverán dichas partículas.

---

<sup>1</sup><https://www.gebco.net/>

<sup>2</sup><https://marine.copernicus.eu/>

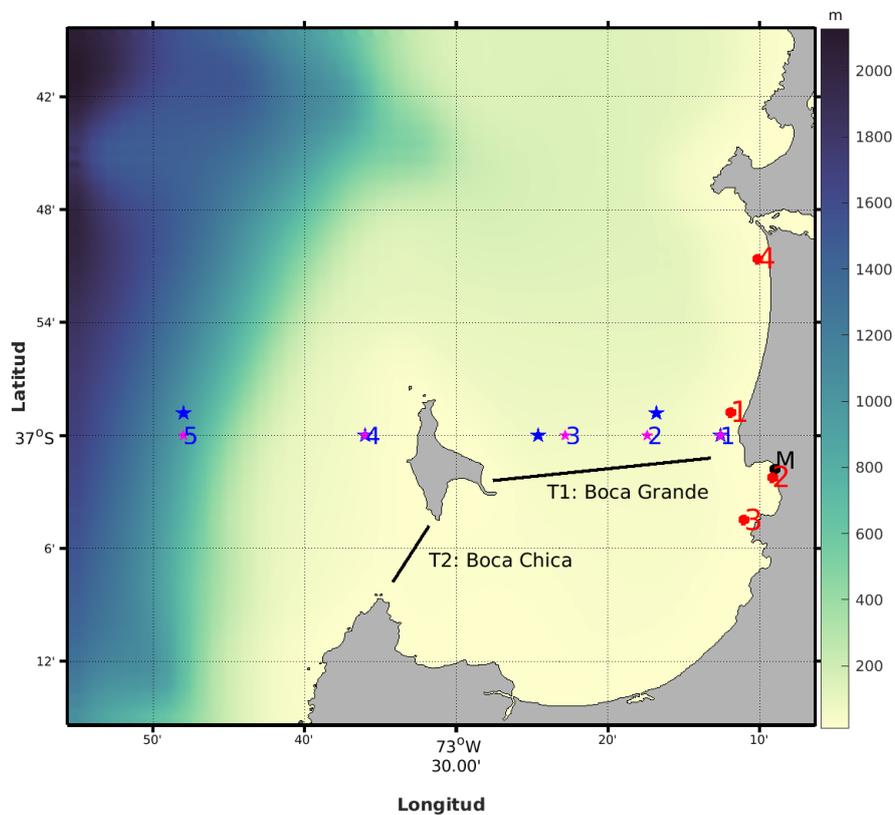
<sup>3</sup><https://dga.mop.gob.cl/>

<sup>4</sup><http://www2.udec.cl/~lopel/index3.html>

## 2.4. Zona de estudio

El dominio anidado se encuentra entre los  $36.6^{\circ}$ – $37.3^{\circ}$ S y  $73.1^{\circ}$ – $73.9^{\circ}$ W aproximadamente, en esta zona se ubican cuatro emisarios submarinos, i. Coronel Norte, ii. Coronel Sur, iii. Lota y iv. San Pedro, sus ubicaciones se encuentran en la tabla 2.4.2 (Contreras, 2017) (Fig. 2.4.1).

### Batimetría del Golfo de Arauco



**Figura 2.4.1:** Mapa de batimetría del Golfo de Arauco. Las ubicaciones de los emisarios submarinos se observan en los puntos rojos 1) Coronel Norte, 2) Coronel Sur, 3) Lota y 4) San Pedro. Con el punto de color negro 'M' se marca la ubicación de los datos SHOA de marea (SHOA, 2014). Con las estrellas en azul se marcan los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 de perfiles de datos FIP del año 2009 (Tapia, 2010). Con las estrellas en magenta se marcan los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 de perfiles de datos FIP del año 2011 (Hidalgo, 2011) (los puntos 1 y 4 se encuentran en la misma ubicación para ambos años). Con las rectas negras se observan las ubicaciones de las transectas T1) Boca Grande, T2) Boca Chica (Valle-Levinson et al., 2003).

Se observan también en el mapa de la zona, las ubicaciones de los perfiles de datos

FIP de temperatura y salinidad para los años 2009 (Tapia, 2010) y 2011 (Hidalgo, 2011) (estrellas azules y magenta respectivamente) y la ubicación de los datos SHOA de marea (punto M en color negro), cuyas ubicaciones se encuentran en la tabla 2.4.1. También están trazadas las transetas T1: Boca Grande y T2: Boca Chica, estas se extienden desde  $37^{\circ}2'24''\text{S}$ ,  $73^{\circ}27'36''\text{W}$  a  $37^{\circ}1'12''\text{S}$ ,  $73^{\circ}13'12''\text{W}$  y desde  $37^{\circ}7'48''\text{W}$ ,  $73^{\circ}34'12''\text{W}$  a  $37^{\circ}4'48''\text{S}$ ,  $73^{\circ}31'48''\text{W}$  respectivamente, los puntos elegidos para la ubicación y extensión de cada sección vertical se tomaron a partir de la Fig. 2 de Valle-Levinson (Fig. A0.1 del apéndice) (Valle-Levinson et al., 2003).

**Cuadro 2.4.1:** Ubicación de los 5 puntos de datos FIP para los años 2009 y 2011 (perfiles) y de datos del SHOA para el año 2014 (serie de tiempo del nivel del mar).

Datos	Año	Latitud	Longitud
FIP 1	2009	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}12'36''\text{W}$
FIP 1	2011	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}12'36''\text{W}$
FIP 2	2009	$36^{\circ}58'48''\text{S}$	$73^{\circ}16'48''\text{W}$
FIP 2	2011	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}17'24''\text{W}$
FIP 3	2009	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}24'36''\text{W}$
FIP 3	2011	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}22'48''\text{W}$
FIP 4	2009	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}36''\text{W}$
FIP 4	2011	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}36''\text{W}$
FIP 5	2009	$36^{\circ}58'48''\text{S}$	$73^{\circ}48''\text{W}$
FIP 5	2011	$37^{\circ}\text{S}$	$73^{\circ}48''\text{W}$
SHOA	2014	$37^{\circ}01'43''\text{S}$	$73^{\circ}09'06''\text{W}$

**Cuadro 2.4.2:** Ubicación de las desembocaduras de los emisarios submarinos Coronel Norte, Coronel Sur, Lota y San Pedro, que se utilizaron para el estudio (Contreras, 2017).

Emisarios	Latitud	Longitud	Profundidad
1) Coronel Norte	$36^{\circ}58'45.84''\text{S}$	$73^{\circ}11'55.32''\text{W}$	37 metros
2) Coronel Sur	$37^{\circ}2'12.84''\text{S}$	$73^{\circ}9'10.8''\text{W}$	37 metros
3) Lota	$37^{\circ}4'29.28''\text{S}$	$73^{\circ}11'2.04''\text{W}$	24.5 metros
4) San Pedro	$36^{\circ}50'37.32''\text{S}$	$73^{\circ}10'18.84''\text{W}$	28 metros

## 2.5. Encadenamiento (Anidado Offline)

En principio, cuando hablamos de un anidado, lo definimos como una simulación de alta resolución (simulación anidada) generada a partir de una simulación de menor resolución (simulación grande), las cuales pueden ser calculadas simultáneamente (online) o de manera independiente (offline). Los anidados se realizan generalmente para observar de mejor manera los procesos que ocurren a escalas menores o para enfocarse en una zona específica dentro de un dominio. Cuando hablamos de una simulación online, tenemos dos opciones:

1. One-way: donde la interacción (transferencia de información) ocurre desde la simulación grande hacia el anidado pero no al revés.
2. Two-way: donde la interacción ocurre en ambos sentidos, es decir, la simulación grande entrega información al anidado y al mismo tiempo, el anidado entrega información al dominio grande.

Cuando hay retroalimentación entre ambas simulaciones, obtenemos una mejoría en los resultados, ya que se traspasa información constantemente. Sin embargo, esto también conlleva un costo computacional importante, además de ser un proceso más complejo. Por otro lado, en un anidado offline o encadenamiento, se realiza la simulación de alta resolución a partir de los resultados (salidas) de la simulación grande, por lo que no hay una retroalimentación entre ambas simulaciones, de esta manera, no hay una gran mejoría en las simulaciones, sin embargo, el proceso para realizar el anidado es más sencillo. Otras ventajas que se pueden destacar son la flexibilidad en cuanto a la orientación de la grilla anidada y que además, el costo computacional es mucho menor, pudiendo lograr un anidado más fino o con más niveles verticales.

En esta investigación, el anidado (o simulación encadenada) se creó de manera offline utilizando las rutinas ROMS2ROMS (Mason et al., 2010) en su versión de MATLAB. Para poder realizarlo, se contó con las salidas de la simulación grande (sección [2.3]), específicamente con un archivo AVG (salidas promedio) del mes de enero del año 2013 y además el archivo GRD (grilla) del dominio. Para generar la grilla y los forzantes atmosféricos del anidado, se utilizó la herramienta **nestgui**, donde se definió una resolución de 1/3 de la simulación grande (tres veces más fina,  $\sim 0,83\text{km}$  de resolución) con un  $L=147$ , un  $M=138$  y 50 niveles verticales.

Luego de tener la grilla y los forzantes atmosféricos del anidado, se aplica la rutina **make\_h.m**, para que la topografía en el borde del anidado coincida con la topografía de la simulación grande. Posteriormente, se crean las condiciones de borde (BRY) aplicando la rutina **make\_r2r.m**. Esta se encarga de interpolar las variables básicas de la simulación grande a la simulación anidada y define cómo se distribuirán los niveles verticales. Luego de obtener el archivo BRY, se crean las condiciones iniciales (INI) aplicando la rutina **r2r\_ini.m**. Esta función trabaja de manera similar a **make\_r2r.m**, pero para un solo paso de tiempo. Una vez tenemos los archivos GRD, FRC, BRY e INI, podemos continuar con las configuraciones de la simulación que trabajará de manera independiente.

## 2.6. Configuración de la simulación y liberación de partículas

Para crear los dos escenarios, se manipuló el archivo FRC, de esta manera se utilizaron los mismos archivos GRD, BRY e INI, pero cada simulación con un FRC distinto. La diferencia entre uno y otro fue la presencia de las variables del viento meridional y zonal. Para la primera simulación (con viento), el archivo FRC opera con todas sus variables y para la segunda simulación (sin viento), el archivo FRC contiene matrices igualadas a cero en las variables de viento. En ambas simulaciones se agregaron los módulos de mareas y de ríos. Para modelar la marea, se utilizaron los datos TPXO7 (de TPXO Global Tidal Models<sup>5</sup> (Egbert and Erofeeva, 2002)) y para los ríos, se incluyó manualmente el río Biobío con un caudal constante de 200 m<sup>3</sup>/s (Valle-Levinson et al., 2003), ubicado cerca de los 36°48'S y 73°10'W y definiendo una salinidad de 10 PSU. Las simulaciones duraron dos meses (enero y febrero), con salidas horarias (HIS) y diarias (AVG).

Para la liberación de partículas, se generó un código básico en OpenDrift, el cual libera 10.000 partículas simples en cada ubicación de los cuatro emisarios que se encuentran en la zona (Fig. 2.4.1), con un radio de un kilómetro y programadas para no quedarse estancadas cuando toquen tierra. Se simulará su movimiento y se estudiará la trayectoria que estas durante los dos meses simulados y con un paso de tiempo de 100 segundos, es decir, cada 100 segundos se calculará una posición, pero se guardarán las posiciones cada una hora.

---

<sup>5</sup><https://www.tpxo.net/home>

## 2.7. Análisis de mareas con T\_TIDE

Para el estudio de las mareas, se analizaron las series de tiempo de nivel del mar en la ubicación **M** (Fig. 2.4.1) con la herramienta T\_TIDE (Pawlowicz et al., 2002). Consiste en un conjunto rutinas para realizar análisis armónico clásico con correcciones nodales y predicciones utilizando constituyentes (entre otras opciones) para series de marea en períodos de 1 año o menos. Con esta herramienta se tiene el análisis armónico implementado en un lenguaje de programación que es muy utilizado: MATLAB. Gracias a la simpleza del código, se puede entender y modificar fácilmente. Los paquetes de rutinas se pueden encontrar en la página web **Rich Pawlowicz's Matlab Stuff** <sup>6</sup> donde se encuentran también las actualizaciones hasta la fecha.

Estas rutinas se usaron para dos gráficos en específico, los cuales muestran un diagrama de frecuencias de las componentes de la marea, y otro que muestra el nivel del mar y la marea astronómica, la cual se puede definir como la oscilación periódica del nivel del mar que es inducida por fuerzas gravitacionales que actúan sobre el mar. Se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$\xi_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \alpha_i)$$

donde:

- $a_0$  es el nivel medio.
- $a_i$  es la amplitud de la onda del componente  $i$ .
- $\omega_i$  es la frecuencia de la onda del componente  $i$ .
- $\alpha_i$  es el desfase.
- $t$  es el tiempo en el cual se calcula la marea.
- $N$  es la cantidad de componentes que se consideran.

Para utilizar la función se necesita como entrada la serie de tiempo de marea y tiene como salida los armónicos, entregando los nombres, las frecuencias, la amplitud, fase y la serie de tiempo de marea astronómica.

---

<sup>6</sup><https://www.eoas.ubc.ca/~rich/>

## Capítulo 3

### Resultados

Cuando nos enfocamos en el viento como factor importante en el movimiento del océano, la principal zona afectada sería la superficie del mar. Por lo tanto, se analizan las diferencias en superficie de las principales variables físicas: nivel del mar, temperatura, salinidad, magnitud y dirección de las velocidades. Otra manera de evaluar las simulaciones es determinar si la marea está bien representada. Para evaluar la marea observamos las series de tiempo de nivel del mar, marea astronómica y los principales constituyentes, comparando el modelo con datos del SHOA (SHOA, 2014) en el punto **M** (Fig. 2.4.1). Con las secciones verticales en Boca Grande y Boca Chica (Fig. 2.4.1) y perfiles verticales se puede comparar el estado de la simulación a distintas profundidades con las características que ya conocemos (literatura (Valle-Levinson et al., 2003) y datos de temperatura y salinidad (Hidalgo, 2011) en los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 (Fig. 2.4.1). Podemos determinar si presenta los rangos característicos de las variables, como también, analizar en qué medida la ausencia del viento afecta a distintas profundidades. La diferencia calculada entre la simulación con viento y la simulación sin viento se realizó tomando los archivos de salida de ambas simulaciones y utilizando la NCO<sup>1</sup>, un conjunto de programas que facilita la manipulación de archivos en formato netCDF. Se calculó [Simulación Sin Viento – Simulación Con Viento] ([S.V.–C.V.]). Luego de analizar las variables en superficie, se puede analizar la distribución de estas, las cuales pueden reflejar qué tan alejados están los resultados entre una simulación y otra. Finalmente, se analizan las trayectorias de las partículas liberadas en los emisarios submarinos para ambas simulaciones.

---

<sup>1</sup><https://nco.sourceforge.net/nco.pdf>

### 3.1. Variables en superficie

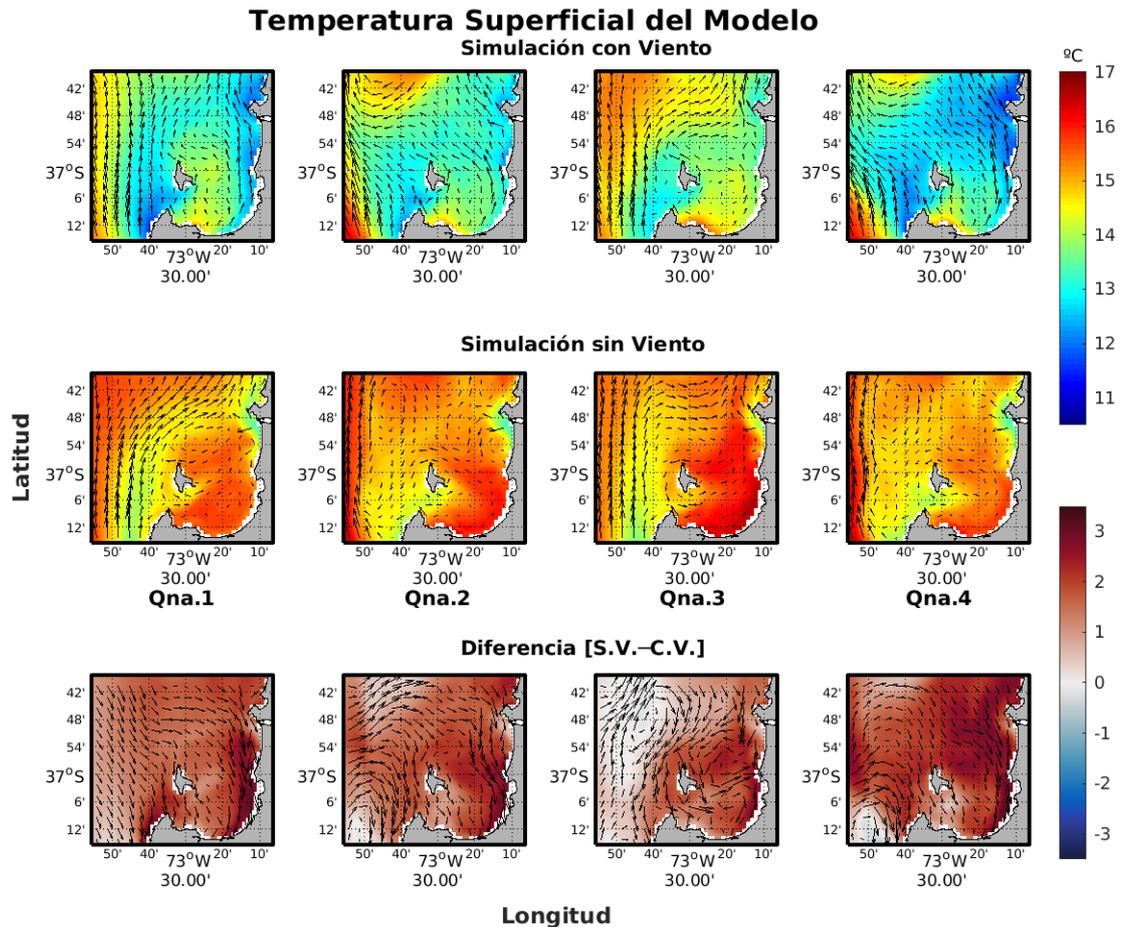
Para evaluar las variables del modelo en superficie, se analizaron las variables de nivel del mar, temperatura, salinidad, velocidad zonal (U), velocidad meridional (V), se calculó la magnitud de las velocidades. Se realizaron mapas promedios de cada variable cada 15 días para ambas simulaciones y se compararon las diferencias [S.V.–C.V.]. Ambas simulaciones van desde el 1 de enero al 1 de marzo del año 2013. Para el análisis de variables en superficie, se promediaron por quincenas, la quincena 1 (Qna. 1) es un promedio que va del día 1 al día 15 de enero, la quincena 2 (Qna. 2) va del día 16 al 30 de enero, la quincena 3 (Qna. 3) va del día 31 de enero al 14 de febrero y la quincena 4 (Qna. 4) va del día 15 de febrero al 1 de marzo. A los mapas superficiales se le añadieron mapas de velocidades para observar la dirección y magnitud de las corrientes (utilizando U y V en una función *quiver*), donde las flechas presentan la misma forma en todos los gráficos. Estos mapas y flechas se crearon a partir de los valores del archivo con viento (primera fila de los mapas), del archivo sin viento (segunda fila) y del archivo de diferencias creado con NCO (tercera fila).

#### 3.1.1. Temperatura

Si observamos las temperaturas superficiales de las simulaciones (Fig. 3.1.1), a simple vista se puede notar una diferencia importante en la temperatura de ambas simulaciones, pero también se pueden observar algunas similitudes en los patrones que muestran. Se destaca, por ejemplo, bajas temperaturas dentro del golfo, en la entrada de Boca Chica, en la costa cercana al río Biobío y al rededor de los  $36^{\circ}58'S$  y fuera del golfo al oeste de la Isla Santa María y de Punta Lavapié. Las temperaturas más altas se ubican entre Punta Lavapié y Arauco dentro del golfo y desde los  $73^{\circ}50'W$  hacia el oeste fuera del golfo. Así también se puede distinguir cómo desde el sur del golfo hacia Boca Grande, el agua va disminuyendo su temperatura.

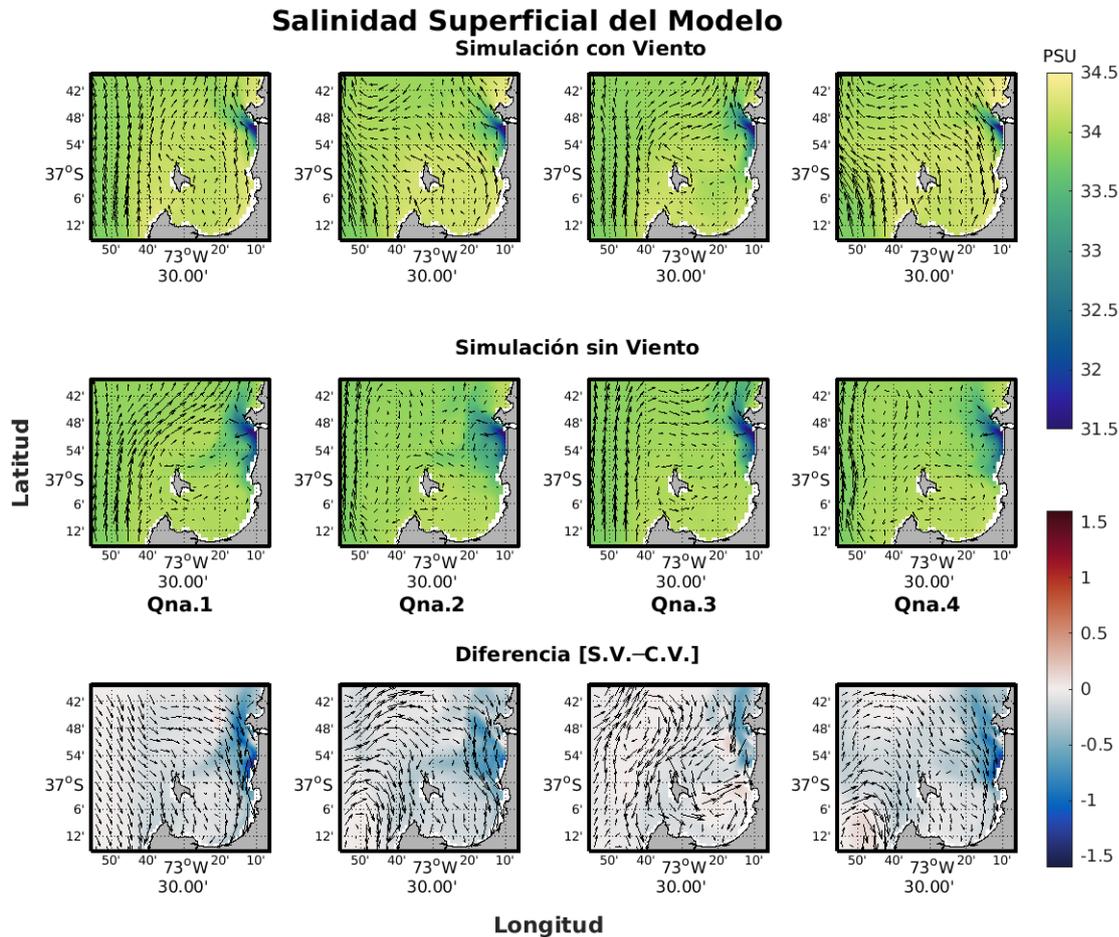
Por otro lado, como ya se mencionó, los valores de temperatura son muy lejanos en una simulación y otra, y es aquí donde recae la gran diferencia entre ellas: en el rango de valores. La simulación sin viento supera hasta en  $3^{\circ}C$  a la simulación con viento. Estas diferencias se alcanzan con más frecuencia en zonas costeras, desde Talcahuano hasta Arauco y al oeste de Punta Lavapié. Dentro del golfo

la temperatura es mayor en la simulación sin viento en todo momento, como también alrededor de la Isla Santa María. Dentro de los mapas de diferencias, la tercera quincena presenta los valores menores y en menor área y la cuarta quincena presenta los valores más altos y que abarcan mayor área.



**Figura 3.1.1:** Temperatura superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de temperatura superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie.

### 3.1.2. Salinidad



**Figura 3.1.2:** Salinidad superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de salinidad superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie.

La fuente de baja salinidad que entrega la descarga del río Biobío afecta de maneras muy distintas en ambas simulaciones. Cerca de la desembocadura se encuentran las diferencias más altas, ya que la distribución del agua dulce presenta distintos patrones. Cuando existe la presencia del viento, la lengua de baja salinidad va hacia el norte como muestran las flechas de corriente. Sin la presencia del viento, la

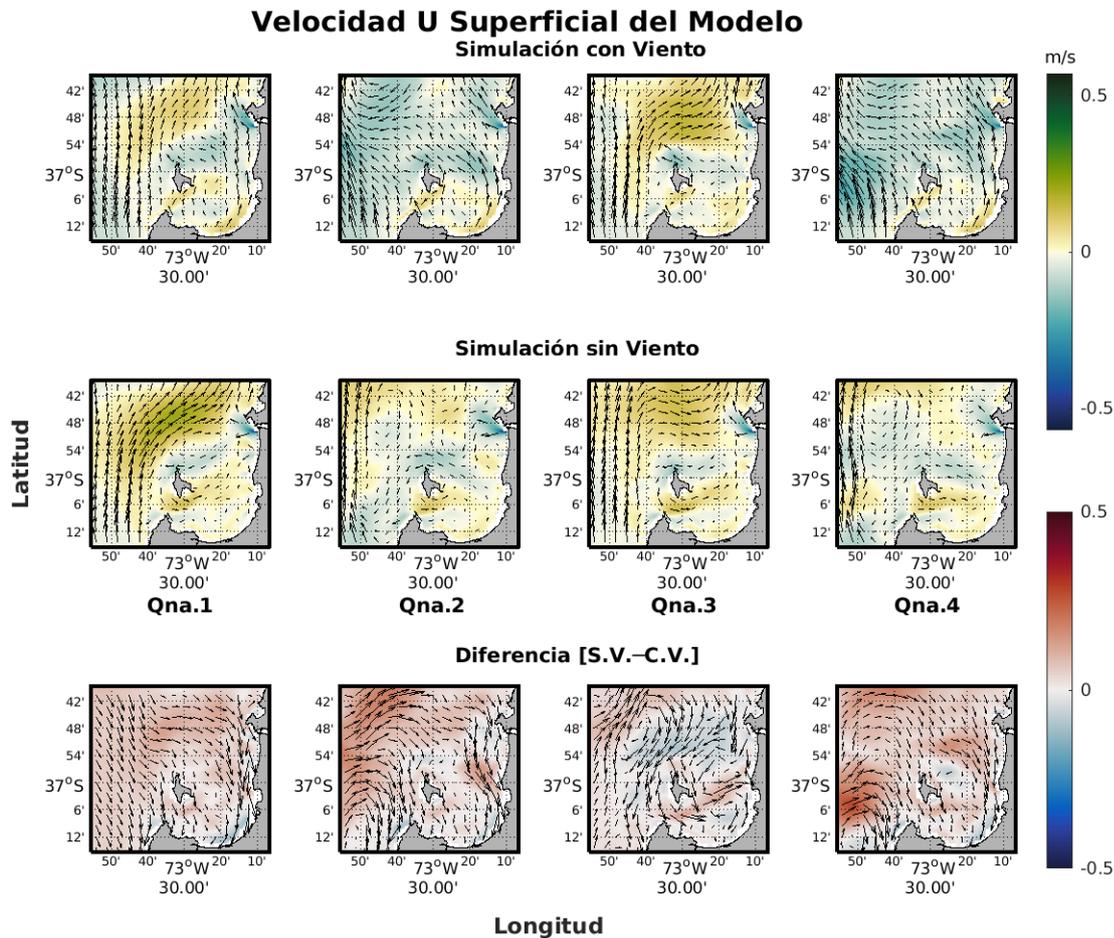
dirección de la descarga del río toma mayor importancia, ya que las corrientes son más débiles. Esto provoca que el agua dulce avance de forma más radial dentro del golfo, ya que no hay corrientes que la lleven más hacia el norte. De esta manera, las mayores diferencias se encuentran en las costas cercanas al río y a lo largo de Boca Grande, llegando a diferencias de 1.5 PSU. Nuevamente se observa la menor diferencia en la tercera quincena.

### 3.1.3. Velocidades

En la velocidad superficial zonal (Fig. 3.1.3) se pueden identificar dos zonas principales: la zona fuera del golfo y el interior del golfo. La simulación con viento muestra en la primera y tercera quincena que la corriente en superficie fuera del golfo viene desde el sur inclinándose al oeste y al aproximarse a la Isla Santa María, se inclina hacia el este hasta juntarse con la corriente producida por la descarga del río. En la simulación sin viento, es menor la inclinación de la corriente hacia el oeste y es más intensa hacia el este. En la segunda y cuarta quincena, predominan las corrientes hacia el oeste cuando hay viento, pero en la simulación sin viento, se observan velocidades hacia el este al norte de la zona y cerca de los 37°S al oeste de la zona. En estas áreas se presenta las mayores diferencias debido al cambio en la dirección de las corrientes. Dentro del golfo se puede identificar en ambas simulaciones una corriente hacia el oeste entre el río Biobío y la Isla Santa María y una corriente hacia el este al sur de la isla. También, la corriente que existe en las costas entre Arauco y Lota va siempre hacia el este, pero saliendo de Boca Grande, se muestran diferencias, donde en el escenario con viento la corriente se inclina hacia el oeste, en el escenario sin viento se pueden encontrar corrientes que se devuelven a la costa. También se puede encontrar en Boca Chica una corriente más intensa hacia el este y que se extiende en una longitud mayor.

En la velocidad superficial meridional (Fig. 3.1.4), cuando hay viento, se puede observar que gran parte de la corriente se dirige al norte. En la primera quincena, la dirección de la corriente fuera del golfo es similar en ambas simulaciones aunque con diferente intensidad. Sin embargo, existe la corriente desde el río Biobío hacia la Isla Santa María que avanza hacia el sur, mostrando velocidades negativas al suroeste de la isla. También se observan velocidades hacia el sur desde la desembocadura del río hasta Lota y en medio del golfo, frente al sureste de la isla, aunque estas son muy débiles. En la segunda quincena, la simulación con viento

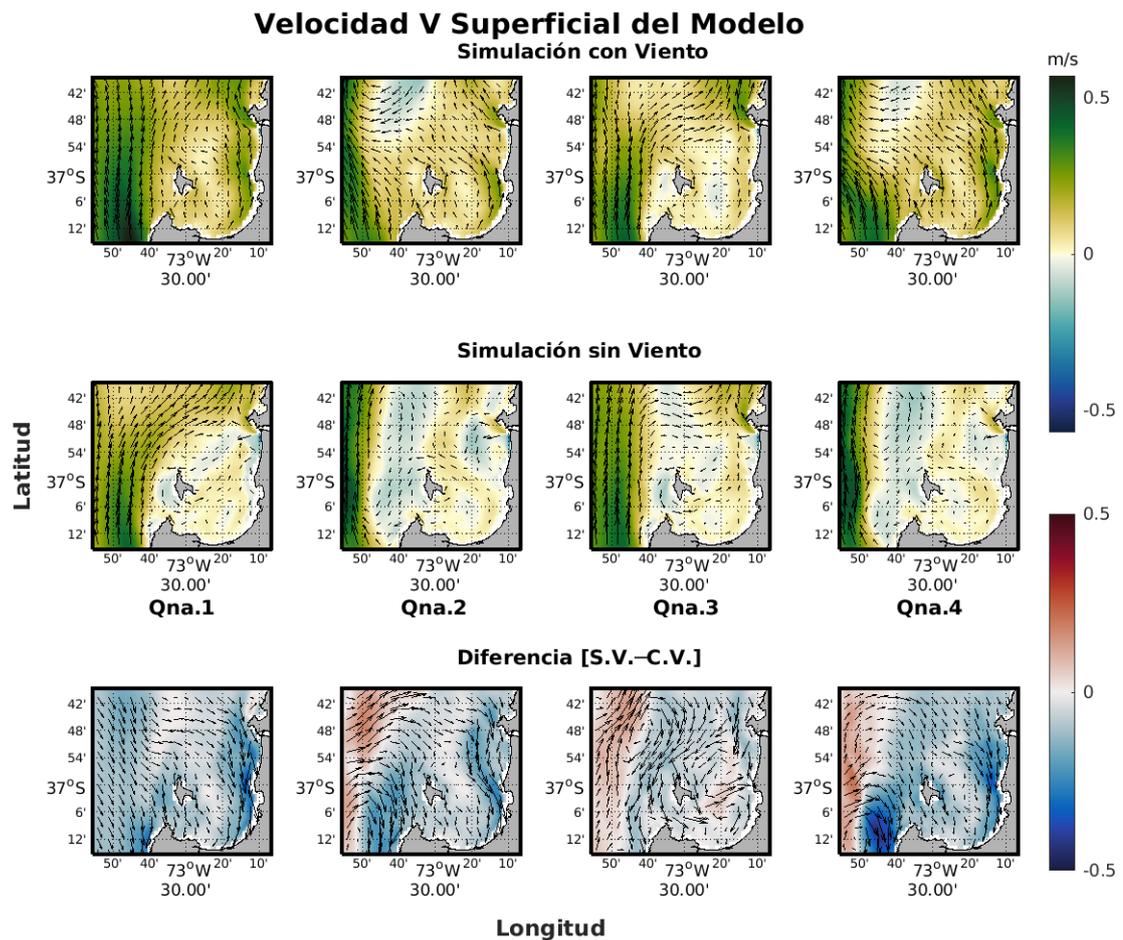
muestra velocidades negativas cerca de los  $36^{\circ}48'S$ , pero en la ausencia del viento, las velocidades negativas se extienden hacia el sur.



**Figura 3.1.3:** Velocidad U superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de velocidad U superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie.

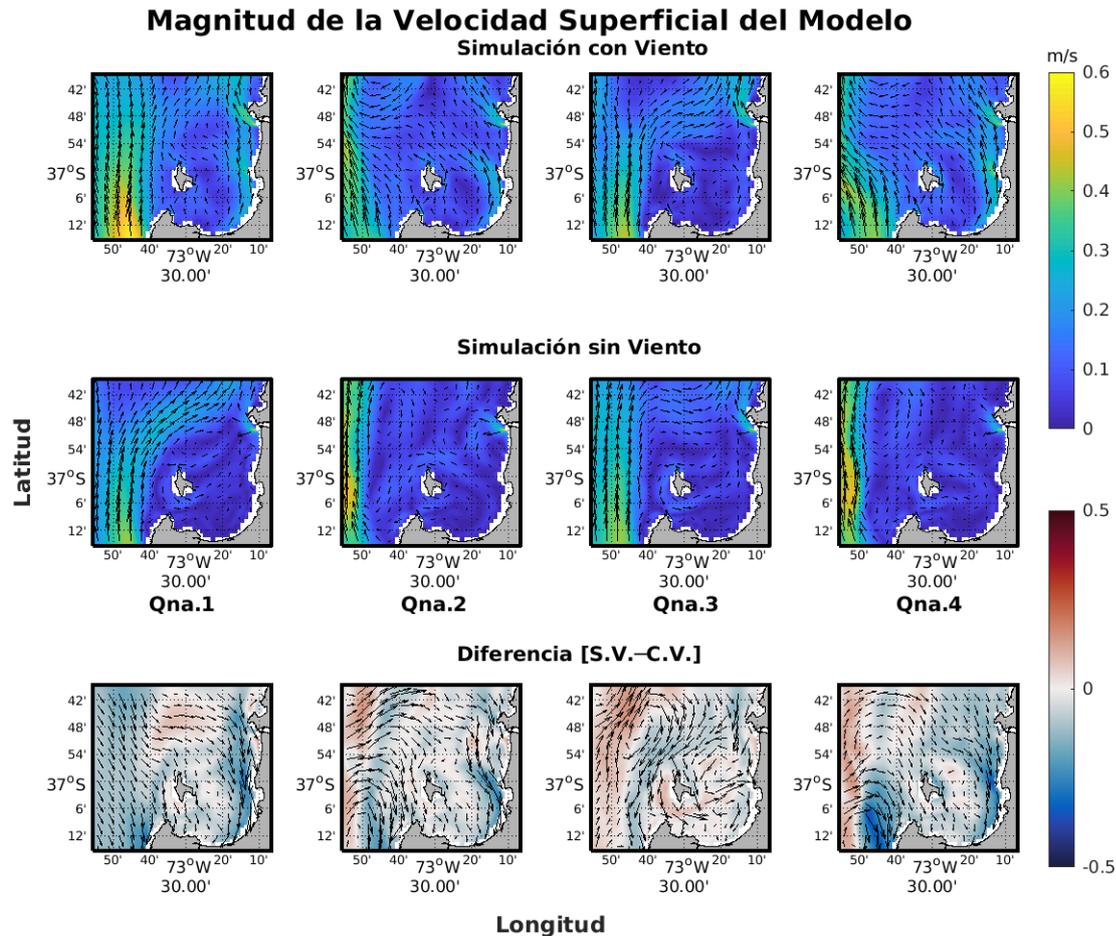
También aparecen velocidades negativas dentro del golfo frente al río Biobío y se extiende por la costa hasta Lota, y como se observó en la velocidad zonal, hay un cambio de dirección de poca magnitud frente al sureste de la Isla Santa María. En la tercera quincena, se observan menos zonas con diferencia en la dirección de las velocidades, pero la simulación sin viento muestra el mismo patrón de velocidades

negativas que se extienden por todas las latitudes del dominio y al oeste de la Isla Santa María, y las velocidades negativas provenientes de la descarga del río Biobío que se dirigen hacia la isla y por otro lado, recorren la costa hasta Coronel. En la cuarta quincena, en ambas simulaciones se presentan patrones casi idénticos a los observados en la segunda quincena. En la simulación con viento las velocidades negativas al norte del dominio tienen una menor extensión comparando las quincenas, en la simulación sin viento se observa el mismo patrón pero con velocidades más bajas que en la segunda quincena.



**Figura 3.1.4:** Velocidad V superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de velocidad V superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie.

Las diferencias más notorias se observan en las quincenas 1, 2 y 4, cerca de las costas al interior (desde el río Biobío hasta Arauco) y al exterior (costa al oeste de Punta Lavapié) del Golfo de Arauco, ya que en estas zonas existen cambios en la dirección de la velocidad meridional.



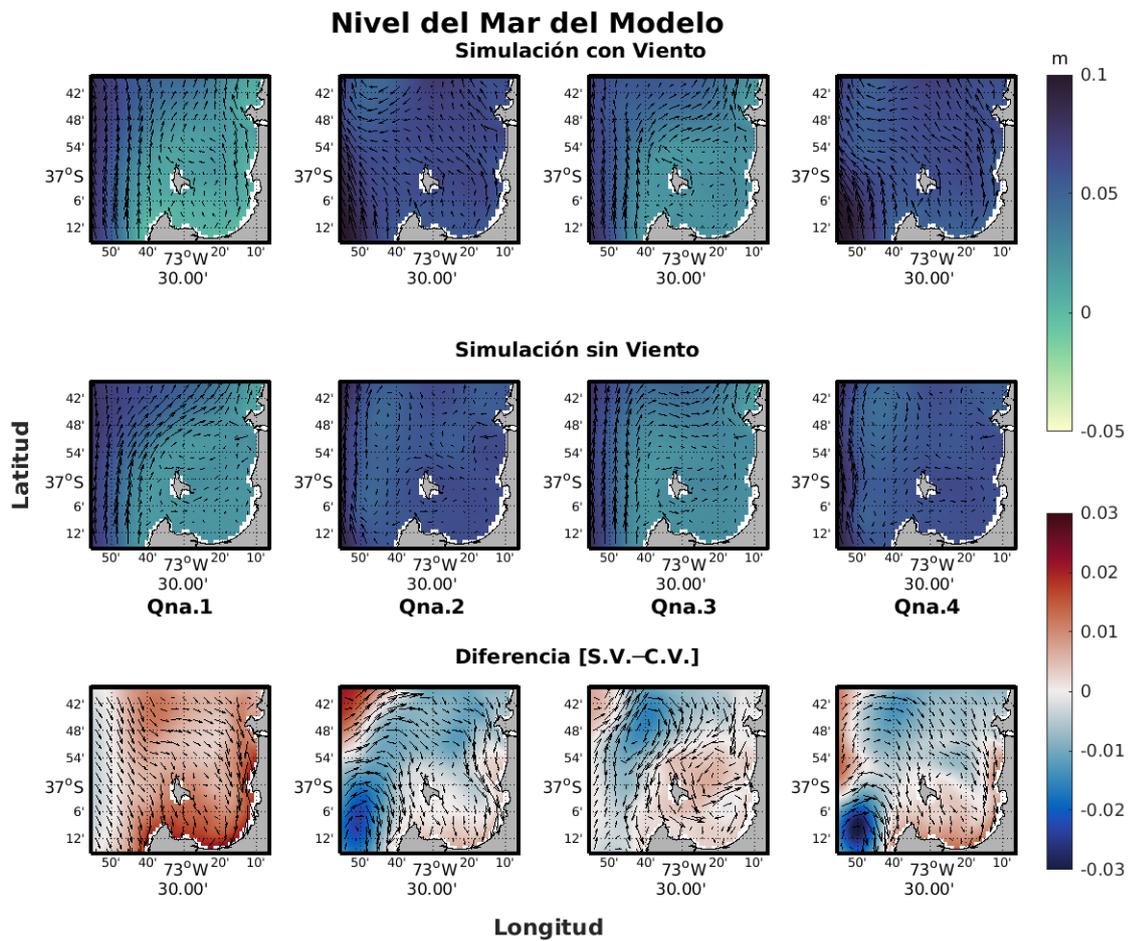
**Figura 3.1.5:** Magnitud de la velocidad superficial del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de magnitud de la velocidad superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie.

Observando las magnitudes de las velocidades (Fig. 3.1.5), vemos que en gran parte del golfo las velocidades son menores cuando no hay viento. Las flechas que muestran las direcciones dejan ver que en las zonas con menor velocidad, suelen

haber cambios en la dirección, como por ejemplo, cerca de las costas y en Boca Grande y Boca Chica. En general, las velocidades hacia el norte tienen mayor magnitud y aquellas hacia el sur son más lentas. Las velocidades dentro del golfo varían entre 0 y 0.3 m/s y fuera del golfo suelen ser superiores a los 0.3 m/s. En los mapas de diferencias, se observan mayores magnitudes en la simulación con viento, es decir, vemos diferencias negativas, las que se ubican mayormente en las costas. Por otro lado, fuera del golfo, cerca de los  $73^{\circ}45'W$  y  $73^{\circ}50'W$ , las magnitudes son mayores en la simulación sin viento. Las mayores diferencias se encuentran desde el río Biobío hasta las costas Arauco y al oeste de Punta Lavapié, que van en un rango entre -0.3 a -0.5 m/s.

#### 3.1.4. Nivel del Mar

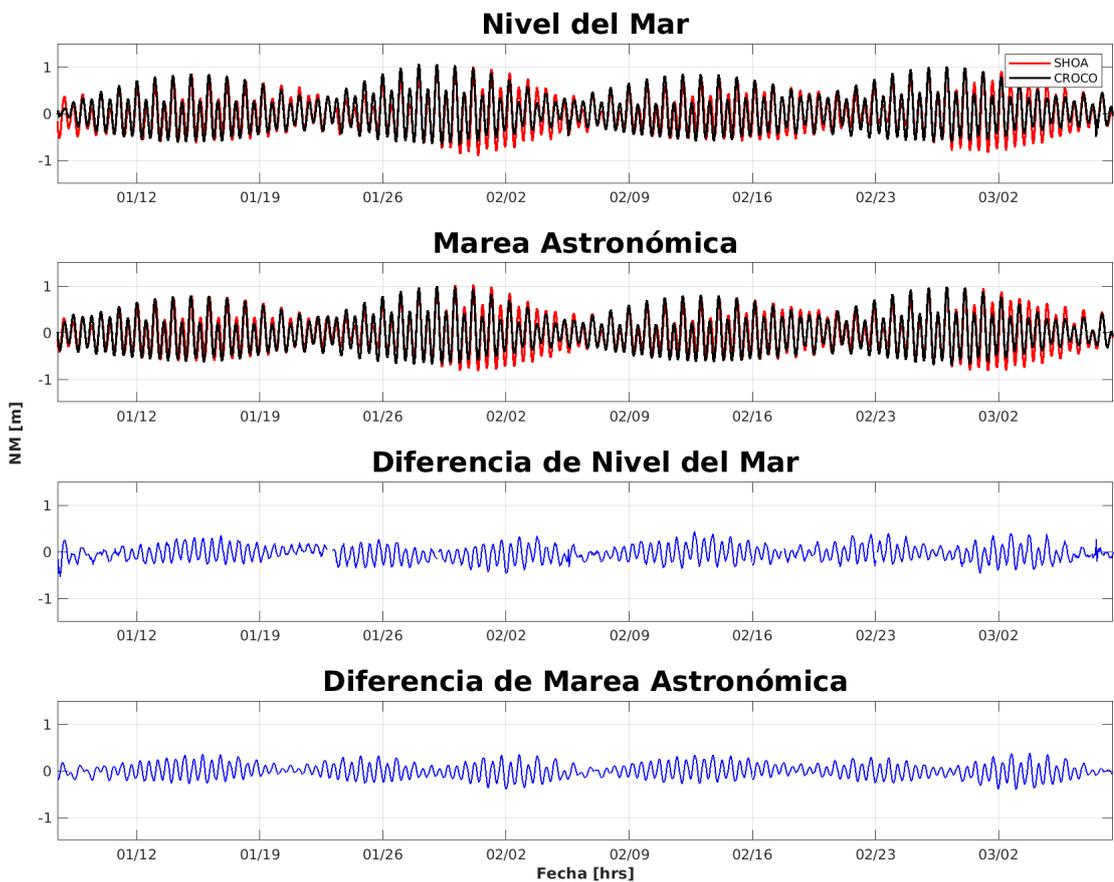
Los patrones de nivel del mar no muestran grandes diferencias entre uno y otro modelo. Las quincenas 1 y 3 muestran valores menores dentro del golfo y mayores fuera de este y en las quincenas 2 y 4, el nivel del mar es mayor que en las otras quincenas. Los valores de marea van entre 0 y 0.5 metros dentro del golfo y fuera de este pueden ser cercanos a 0.1 o superiores. Las diferencias muestran rangos entre -0.03 a 0.03 metros. En general, la simulación sin viento muestra un nivel del mar más elevado que la simulación con viento al interior del golfo, siendo más notorio en la primera quincena. En la segunda y cuarta quincena, vemos un patrón similar de diferencias, donde el nivel del mar al oeste y norte del golfo, es mayor en la simulación con viento. Se observan los mayores valores de diferencia al oeste, frente a Isla Santa María y Punta Lavapié, con valores cercanos a -0.03. En la tercera quincena, observamos diferencias menores que varían entre -0.02 a 0.01 metros, manteniendo el patrón con valores mayores de nivel del mar dentro del golfo en la simulación sin viento y con valores mayores fuera del golfo en la simulación con viento.



**Figura 3.1.6:** Nivel del mar del modelo. Se presenta en la primera fila los resultados de la simulación con viento, en la segunda fila los resultados de la simulación sin viento y en la tercera fila las diferencias entre ambas simulaciones ([S.V. - C.V.]). Las cuatro columnas representan los promedios de temperatura superficial para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (Qna.1, Qna.2, Qna.3 y Qna.4). Las flechas superpuestas en cada mapa representan la dirección de la corriente en superficie.

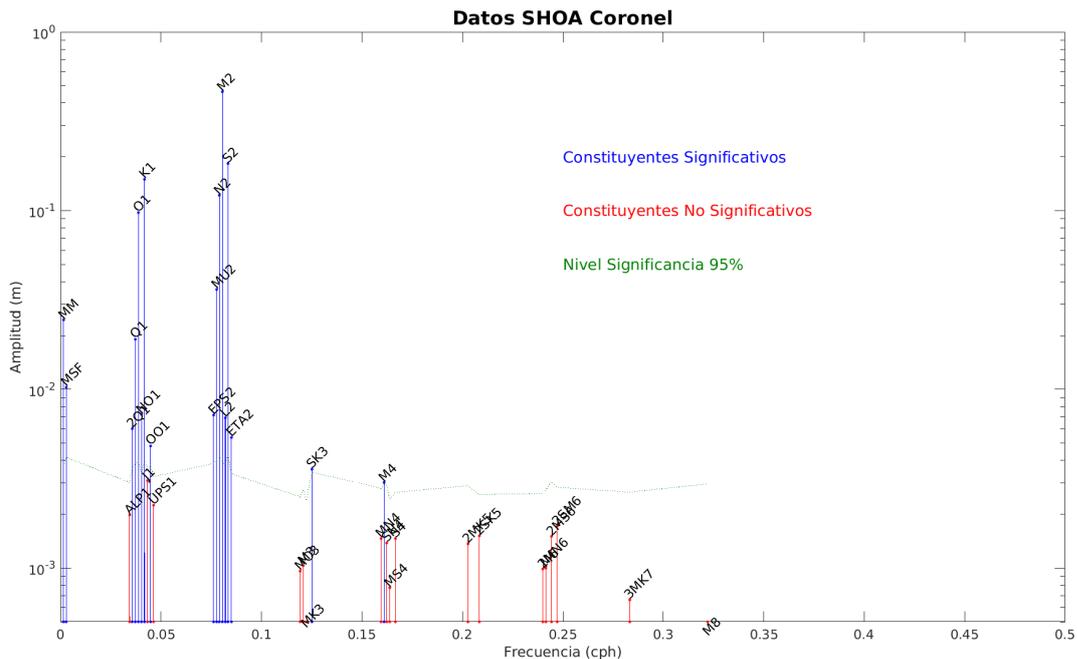
## 3.2. Mareas

Se evalúa el nivel del mar comparando las series de tiempo los datos del SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada) y de la simulación con viento desde enero hasta principios de marzo en el punto  $37^{\circ}01'43''\text{S}$   $73^{\circ}09'06''\text{W}$ . Para realizar el análisis armónico se utilizó el paquete de herramientas T\_TIDE (Pawlowicz et al., 2002), con él, se producen series de tiempo del nivel del mar, de la marea astronómica y diagramas de frecuencia para los datos y la simulación. También proporciona las amplitudes de los constituyentes, de los cuales compararemos M2 y S2 (mostrados en la tabla 3.2.1).



**Figura 3.2.1:** Series de tiempo de marea. En las primeras filas se observan las series de tiempo de nivel del mar y marea astronómica para los datos y el modelo. En la tercera y cuarta fila se observan las diferencias entre las series de tiempo de nivel del mar y marea astronómica [Datos - Modelo].

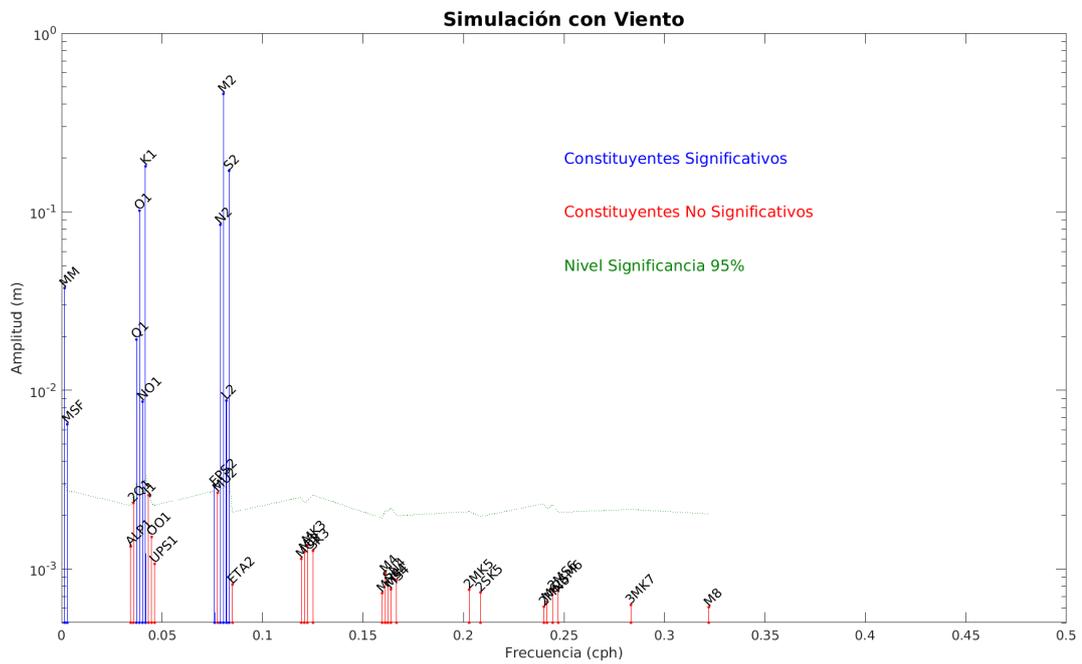
Se observan las series de tiempo de nivel del mar y de marea astronómica (Fig. 3.2.1). Se marca en color rojo los datos del SHOA, en color negro las salidas del modelos CROCO y en color azul las diferencias de nivel del mar y marea astronómica entre ambas series con la operación [Datos – Modelo]. En ambos casos, vemos que las series de tiempo tienen rango de  $\pm 1$  metro, tanto en el nivel del mar como en la marea astronómica. Se observan periodos de tiempo en donde los datos muestran mayor amplitud, como entre el 29 de enero y 7 de febrero y entre el 27 de febrero y 6 de marzo. Por otro lado, existen también periodos en donde la simulación tiene amplitudes mayores, como entre el 22 y 29 de enero y entre el 21 y 27 de febrero. Las diferencias son de no más de  $\pm 0.5$  metros. Se puede notar una gran similitud en las formas de las series de nivel del mar y marea astronómica, por lo que se puede decir que las señales de mares son dominadas por esta última.



**Figura 3.2.2:** Diagrama de frecuencias generado a partir de los datos de marea del SHOA. La gráfica muestra constituyentes significativos y no significativos utilizando un nivel de significancia de 95%. Se observan los constituyentes significativos por sobre la línea punteada verde y los no significativos por debajo de ella.

En los diagramas de frecuencia se muestran los constituyentes de las mareas (Fig. 3.2.2, Fig. 3.2.3). Con la línea verde se define a qué amplitud y frecuencia el

constituyente es significativo, tomando un nivel de significancia del 95 %. Se marcan con azul aquellos constituyentes significativos y con rojo los no significativos. En ambos casos, se da que los principales constituyentes son significantes, entre ellos, M2 y S2. Tomando en consideración un periodo de dos meses, las amplitudes para M2 fueron de 0.463 metros en los datos y 0.457 en la simulación. Para S2, las amplitudes fueron de 0.184 metros en los datos y 0.17 metros en la simulación (tabla 3.2.1). La diferencia de M2 es de 0.006 metros y en S2 es de 0.014 metros.



**Figura 3.2.3:** Diagrama de frecuencias generado a partir de las salidas del modelo. La gráfica muestra constituyentes significativos y no significativos utilizando un nivel de significancia de 95 %. Se observan los constituyentes significativos por sobre la línea punteada verde y los no significativos por debajo de ella.

**Cuadro 3.2.1:** Tabla comparativa de constituyentes M2 y S2 para los datos del SHOA y las salidas del modelo con viento.

Serie de tiempo	Amplitud M2	Amplitud S2
Datos SHOA	0.46 [m]	0.18 [m]
Salida CROCO	0.45 [m]	0.17 [m]

### 3.3. Transectas

Las transectas estudiadas están ubicadas en Boca Grande (que va desde  $37^{\circ}2'24''\text{S}$ ,  $73^{\circ}27'36''\text{W}$  a  $37^{\circ}1'12''\text{S}$ ,  $73^{\circ}13'12''\text{W}$ ) y Boca Chica (desde  $37^{\circ}7'48''\text{S}$ ,  $73^{\circ}34'12''\text{W}$  a  $37^{\circ}4'48''\text{S}$ ,  $73^{\circ}31'48''\text{W}$ ) (Fig. 2.4.1). Estas posiciones van de acuerdo a lo que se observa en la figura 2 de Valle-Levinson (Valle-Levinson et al., 2003) (Fig. A0.1). Las figuras de estas secciones del modelo se crean a partir del promedio total de los dos meses simulados para las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V).

#### 3.3.1. Validación en Boca Grande

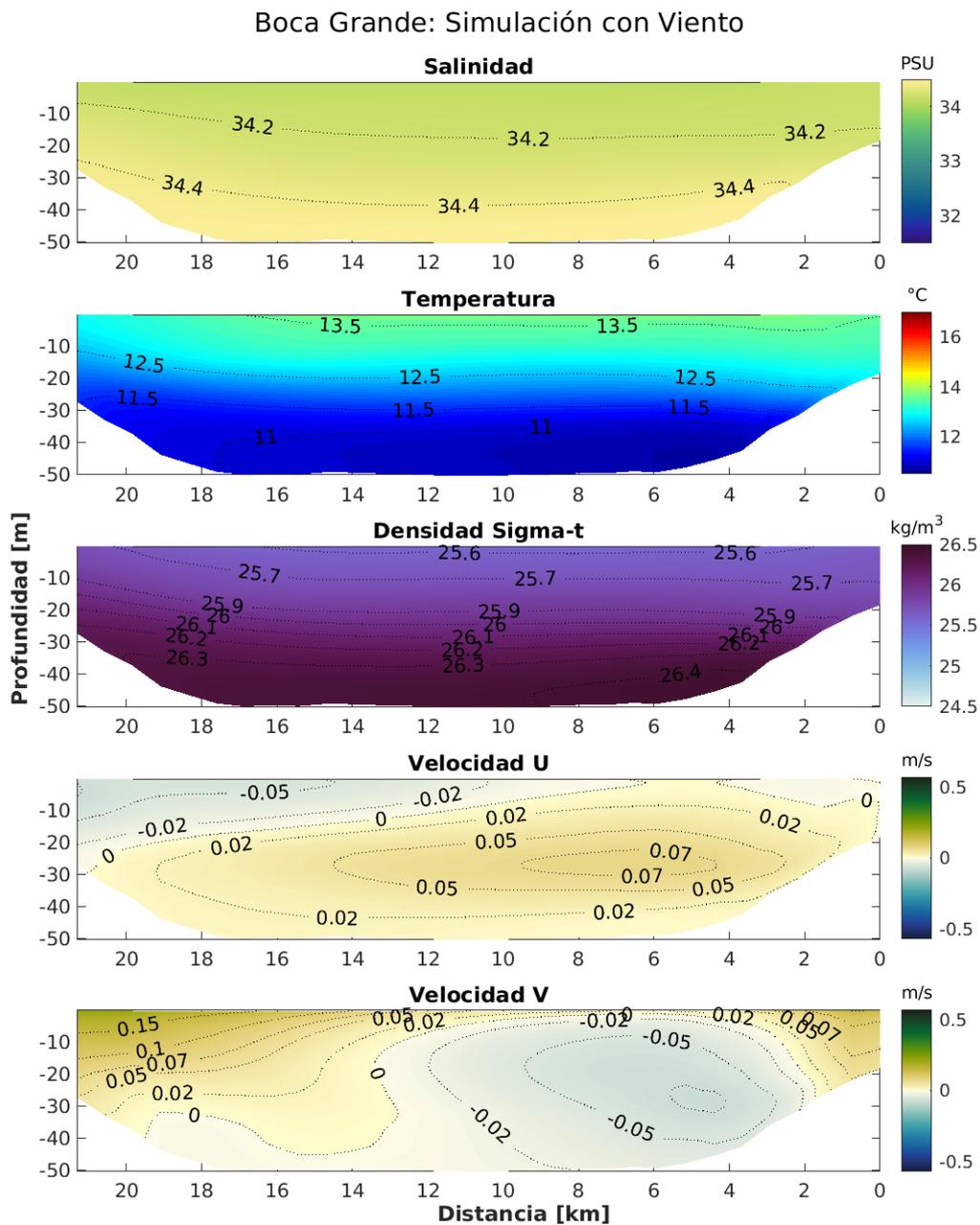
Para validar la simulación a través de las secciones verticales, se compararon las salidas de la simulación con viento (Fig. 3.3.1) con los datos del muestreo realizado por Valle-Levinson (Valle-Levinson et al., 2003) en Boca Grande (Fig. A0.2). Los valores se extrajeron de la Fig. 4 del artículo para las variables de salinidad, temperatura y densidad. Se pueden observar de forma clara las diferencias en la tabla 3.3.1, donde se comparan los valores en las profundidades a 10, 20, 30 y 40 metros. La operación realizada para calcular las diferencias fue [Datos Valle-Levinson – Simulación con viento]. Para la fecha de diciembre de los datos, los valores de salinidad y densidad son superiores a los valores de estas variables en enero-febrero de la simulación. La salinidad de los datos puede superar en hasta  $0.2[\text{PSU}]$  a la salinidad de la simulación en la superficie, pero las diferencias disminuyen a mayor profundidad. También se puede observar este comportamiento en la densidad, con diferencias que podrían llegar a  $0.5[\text{kg}/\text{m}^3]$  dentro de los 20 primeros metros de profundidad y luego de los 30 metros disminuye quedando diferencias entre  $0.2$  y  $0.3[\text{kg}/\text{m}^3]$ . En caso de la temperatura, la presentada por el modelo en enero-febrero es superior a la que muestran los datos, pero las diferencias alcanzan valores superiores desde los 20 metros hacia el fondo y no en superficie, teniendo una diferencia de al rededor de  $-0.5[{}^{\circ}\text{C}]$  a 10 metros y diferencias que alcanzan valores mayores a  $1[{}^{\circ}\text{C}]$  a más profundidad.

**Cuadro 3.3.1:** Tabla comparativa de valores de salinidad, temperatura y densidad para los datos del 6 de diciembre de Valle-Levinson (Valle-Levinson et al., 2003) (valores extraídos de la Fig. 4 del artículo) y para las salidas de la simulación con viento. Se comparan los valores observados a 10, 20, 30 y 40 metros de profundidad y se calcula la diferencia [Datos–Simulación].

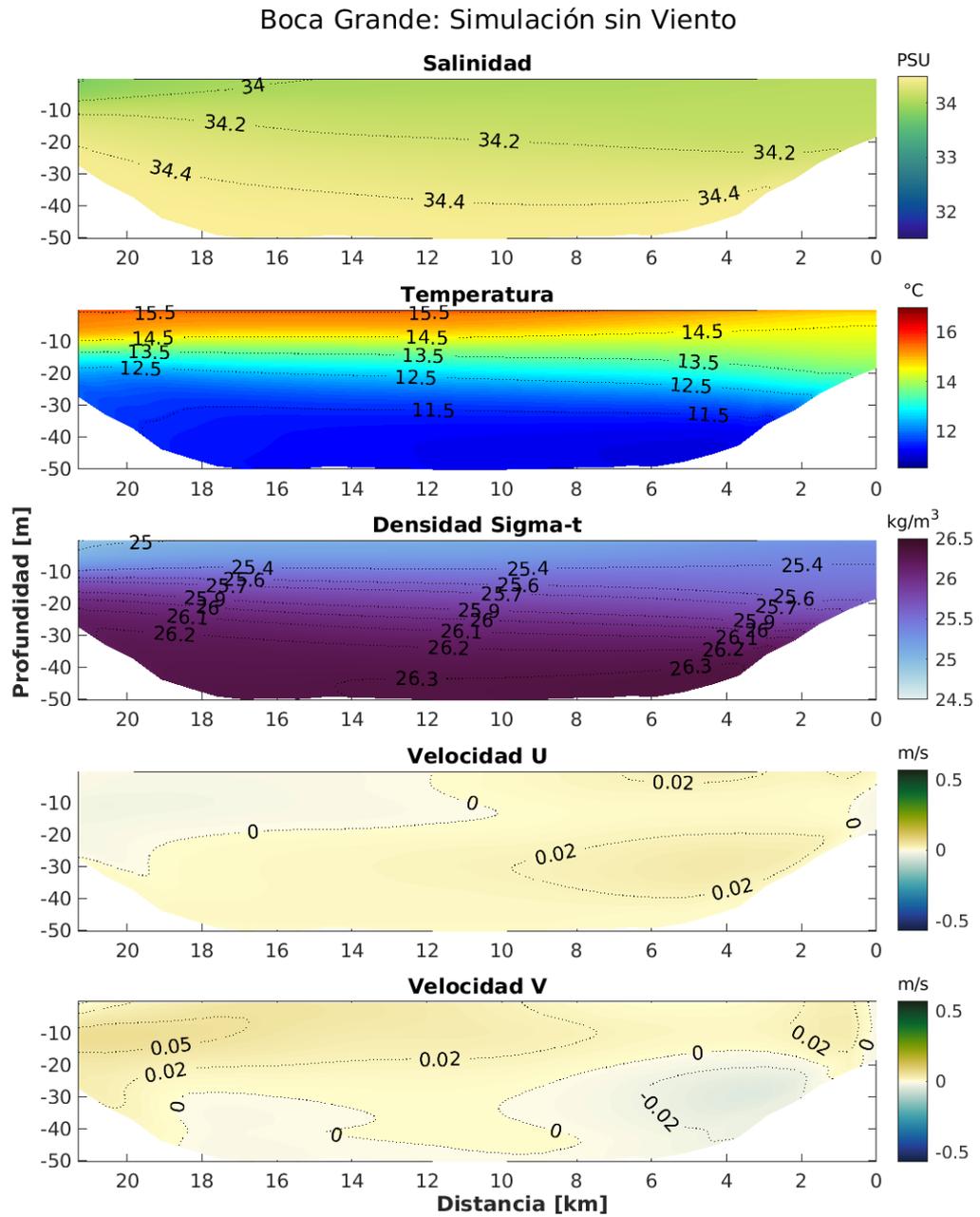
Profundidad	Datos Valle-Levinson	Simulación con viento	Diferencia
Salinidad			
A 10 m	34.4 [PSU]	34.2 [PSU]	~ +0.2 [PSU]
A 20 m	34.4–34.5 [PSU]	34.2–34.3 [PSU]	~ +0.1 [PSU]
A 30 m	>34.5 [PSU]	34.4 [PSU]	~ +0.1 [PSU]
A 40 m	>34.5 [PSU]	>34.4 [PSU]	~ +0.1 [PSU]
Temperatura			
A 10 m	12.5–13 [°C]	13–13.5 [°C]	~ -0.5 [°C]
A 20 m	10.5–11 [°C]	12.5 [°C]	~ -1.5 – -2 [°C]
A 30 m	10–10.5 [°C]	11.5 [°C]	~ -1 – -1.5 [°C]
A 40 m	9.5–10 [°C]	11 [°C]	~ -1 – -1.5 [°C]
Densidad			
A 10 m	26.1–26.3 [kg/m <sup>3</sup> ]	25.7–25.9 [kg/m <sup>3</sup> ]	~ +0.4 [kg/m <sup>3</sup> ]
A 20 m	26.4–26.5 [kg/m <sup>3</sup> ]	25.9–26.0 [kg/m <sup>3</sup> ]	~ +0.5 [kg/m <sup>3</sup> ]
A 30 m	26.5–26.6 [kg/m <sup>3</sup> ]	26.1–26.3 [kg/m <sup>3</sup> ]	~ +0.3 [kg/m <sup>3</sup> ]
A 40 m	26.5–26.6 [kg/m <sup>3</sup> ]	26.3–26.4 [kg/m <sup>3</sup> ]	~ +0.2 [kg/m <sup>3</sup> ]

### 3.3.2. Comparación de las salidas del modelo en Boca Grande

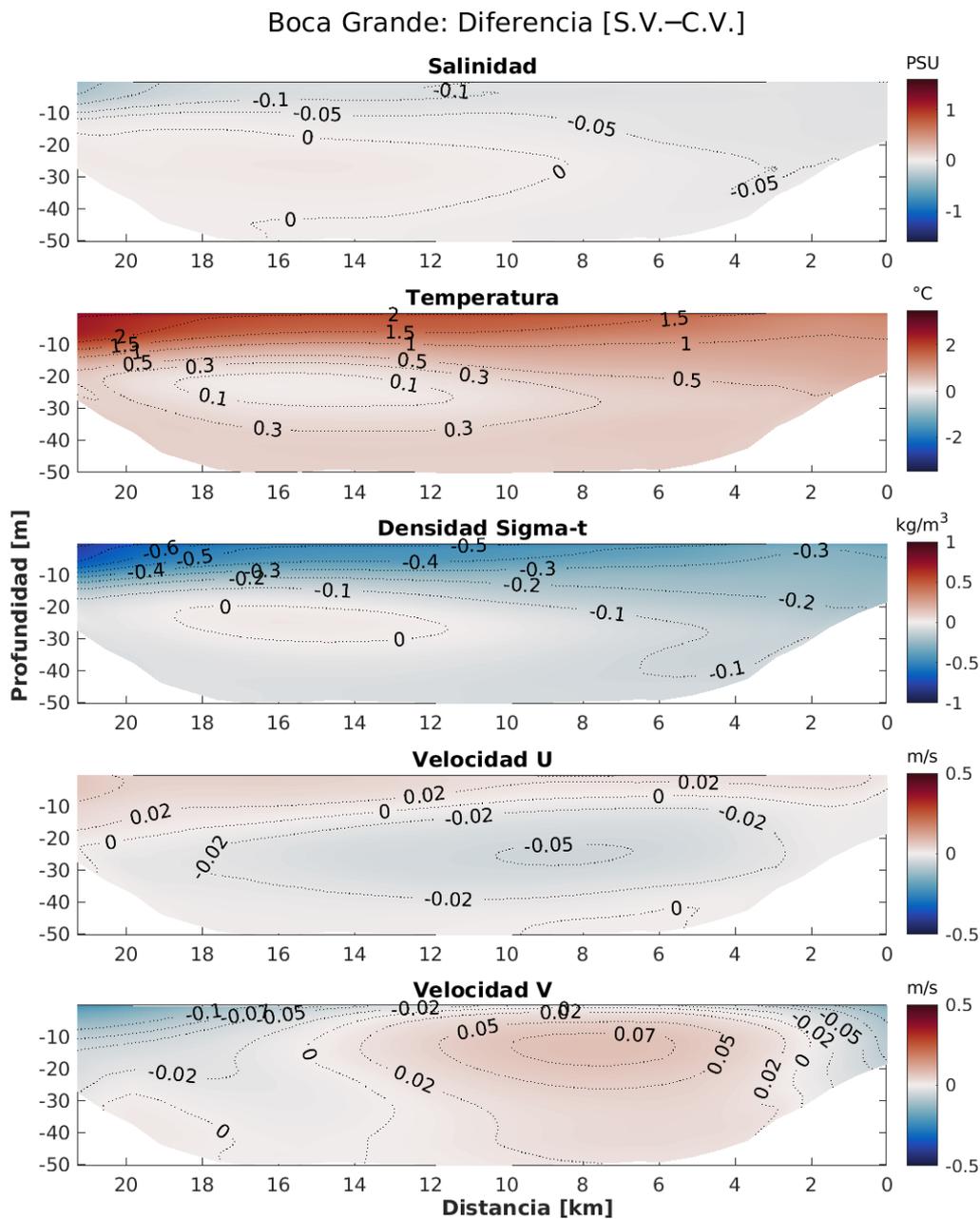
Observamos la sección vertical en Boca Grande obtenida a partir de la simulación con viento (Fig. 3.3.1), la simulación sin viento (Fig. 3.3.2) y las diferencias entre ambas (Fig. 3.3.3). La transecta va desde los 0km (Isla Santa María) a los 22km (Coronel). Al comparar los dos escenarios, notamos en la salinidad que la simulación sin viento muestra los valores menores en la capa superficial, lo que es más notorio entre los 12 y 22km (cerca de la costa), donde las diferencias van desde -0.25 a -0.1 PSU. La diferencia de temperatura con valores más altos se concentra cerca de la costa y en los primeros 10 metros, donde las diferencias se encuentran entre 1 y 2.5°C, las cuales disminuyen a más profundidad. La densidad es menor en la simulación sin viento y se observan las mayores diferencias cerca del río, las cuales están en un rango entre -0.7 y -0.4 en los primeros 10 metros de profundidad.



**Figura 3.3.1:** Sección vertical de la simulación con viento en Boca Grande. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V).



**Figura 3.3.2:** Sección vertical de la simulación sin viento en Boca Grande. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V).

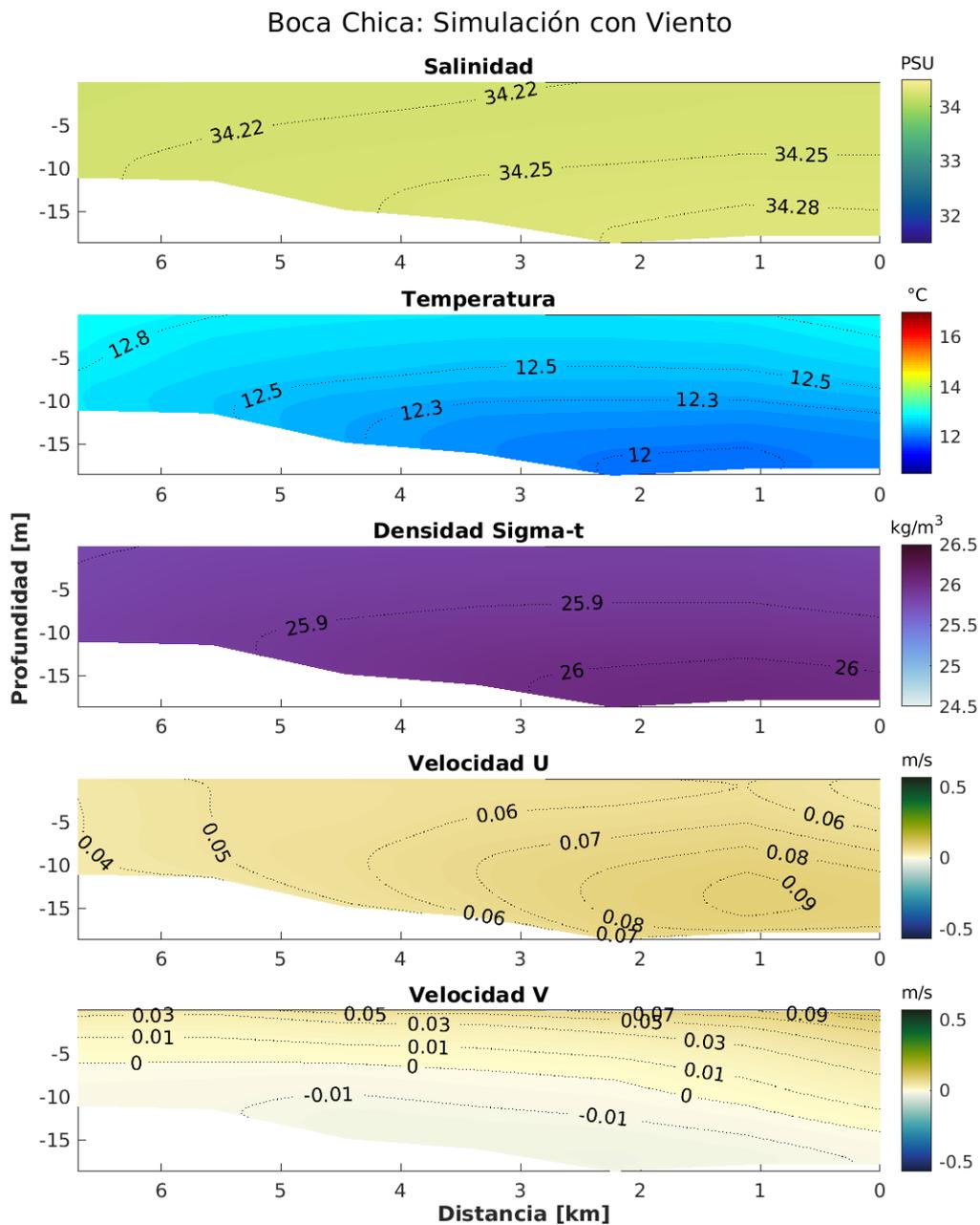


**Figura 3.3.3:** Diferencia de las simulaciones en Boca Grande. Se muestran las diferencias entre la simulación con viento y sin viento de las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V).

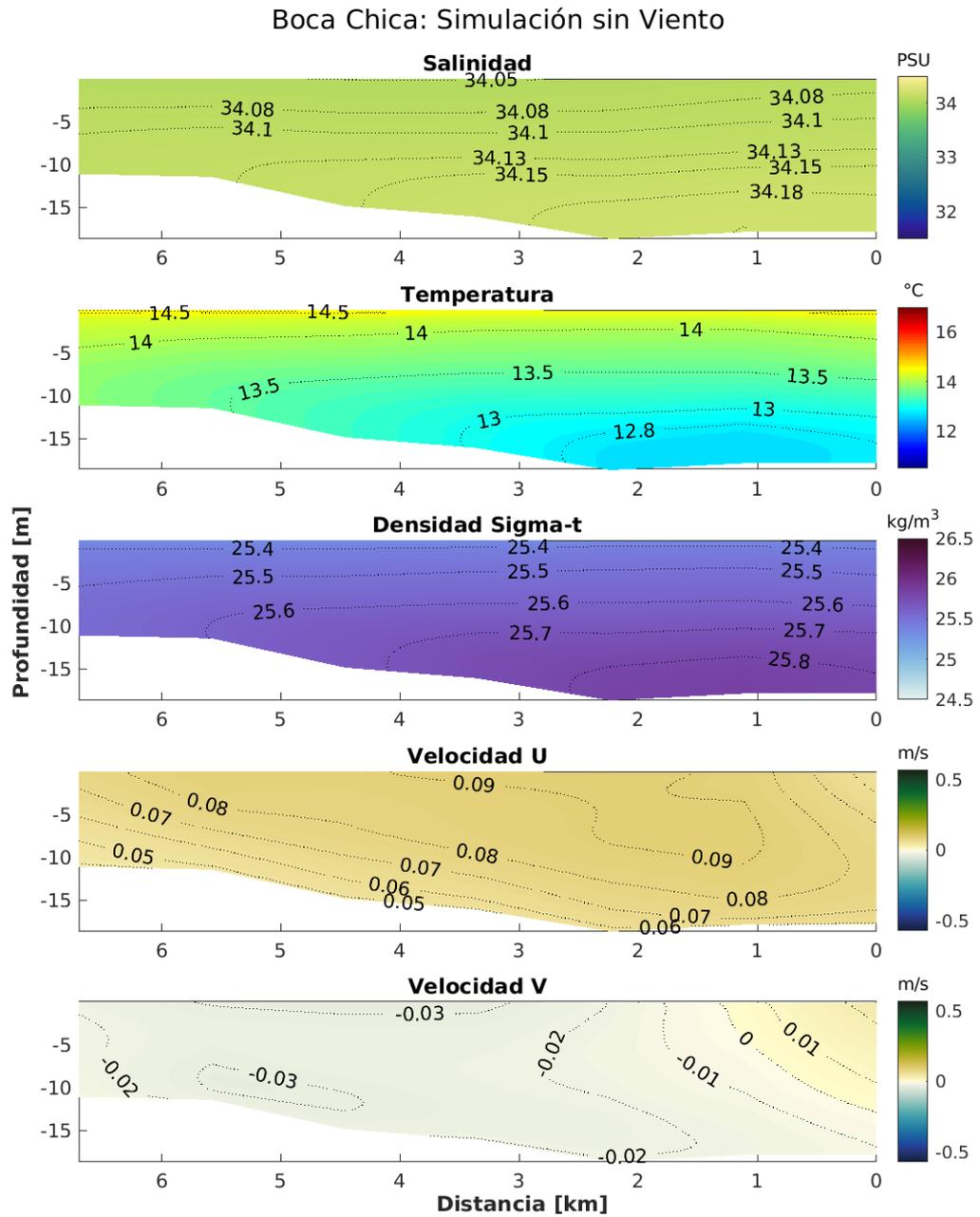
La velocidad zonal muestra un patrón similar en ambas simulaciones, es decir, hay velocidad hacia el oeste cerca de la costa y hacia el este cerca de la Isla Santa María en aguas más profundas. En contraste, la simulación sin viento muestra velocidades hacia el este en superficie, cerca de la Isla Santa María (entre los 0 y 12km de distancia). La diferencia más notoria entre ambas simulaciones está en la magnitud de las velocidades, las positivas (hacia el este) llegan hasta 0.07 m/s con viento y hasta 0.03 m/s sin viento. Las velocidades negativas (hacia el oeste) llegan hasta 0.06 m/s con viento y 0.01 m/s sin viento. Las diferencias van de -0.05 a 0.05 m/s. Por otro lado, en ambas simulaciones, la velocidad meridional muestra una capa superficial con velocidad positiva (hacia el norte) y cerca de la Isla Santa María, bajo los 10 metros de profundidad, muestra velocidad negativa (hacia el sur). Tal como en la velocidad zonal, la principal diferencia es la magnitud, donde las velocidades positivas llegan hasta 0.2 m/s con viento y hasta 0.05 m/s sin viento y las velocidades negativas llegan hasta 0.07 m/s con viento y 0.03 m/s sin viento aproximadamente. El mapa de diferencias muestra valores entre -0.15 y 0.08 m/s y se concentran en superficie, donde se observa la diferencia de magnitud (en azul) y la diferencia en la dirección (en gris).

### 3.3.3. Comparación de las salidas del modelo en Boca Chica

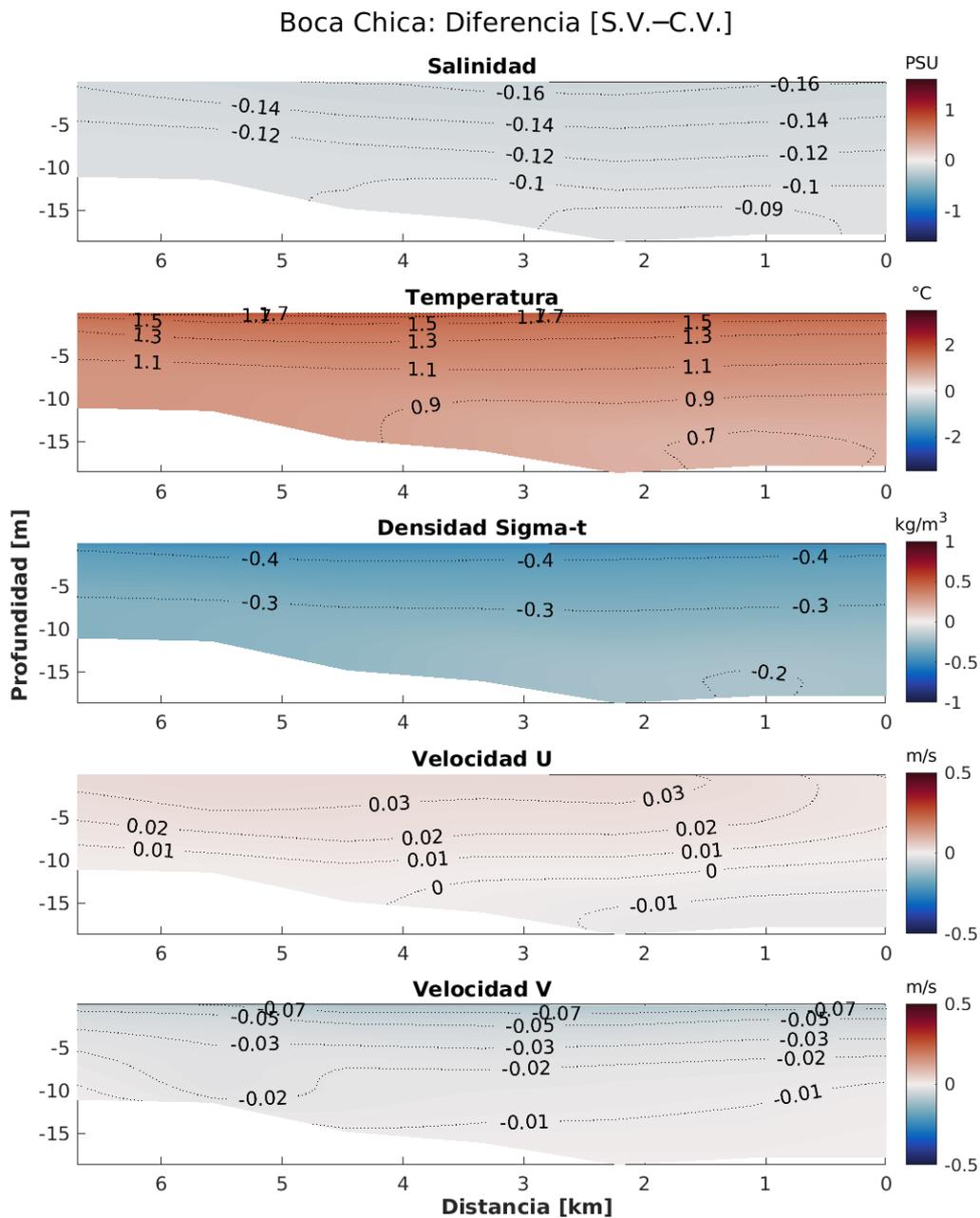
Observamos la sección vertical en Boca Chica obtenida a partir de la simulación con viento (Fig. 3.3.4), la simulación sin viento (Fig. 3.3.5) y las diferencias entre ambas (Fig. 3.3.6). La sección va desde los 0km (Punta Lavapié) a los 7km (Isla Santa María). En general, las diferencias son más homogéneas y estas van disminuyendo con la profundidad. La salinidad sigue siendo menor en la simulación sin viento, encontrando diferencias que van desde los -0.16 a -0.08 PSU. La temperatura muestra patrones similares en ambas simulaciones y con diferencias que van entre los 0.9 y 1.7 hasta los 10 metros, mostrando mayor temperatura en un escenario sin viento. Por otro lado, la densidad tiene diferencias entre -0.45 y -0.2 a lo largo de la profundidad, con mayores valores en la simulación con viento.



**Figura 3.3.4:** Sección vertical de la simulación con viento en Boca Chica. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V).



**Figura 3.3.5:** Sección vertical de la simulación sin viento en Boca Chica. Se muestran las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V).



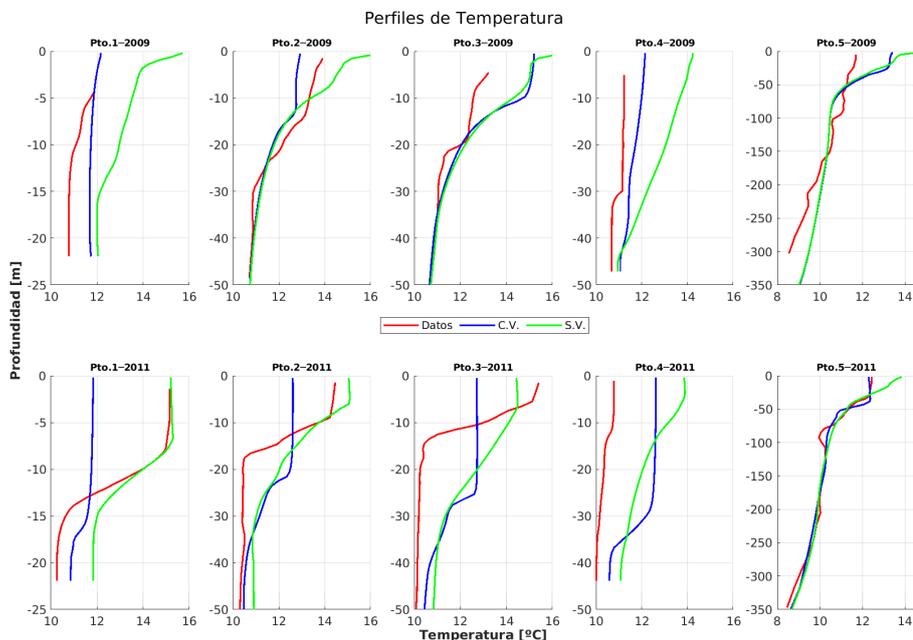
**Figura 3.3.6:** Diferencia de las simulaciones en Boca Chica. Se muestran las diferencias entre la simulación con viento y sin viento de las variables de salinidad, temperatura, densidad, velocidad zonal (U) y velocidad meridional (V).

En cuanto a las velocidades zonales, en ambas simulaciones vemos que en Boca Chica hay movimiento hacia el este, pero las zonas de mayores velocidades tienen diferente ubicación. Mientras que con viento se observan mayores velocidades (hasta 0.09 m/s) cerca de los 10 metros de profundidad y va disminuyendo a profundidades menores, sin viento se muestran estos valores en casi la totalidad de la sección, además se concentra por sobre los 10 metros de profundidad. De esta manera, las diferencias de mayor magnitud se concentran en la superficie llegando por sobre los 0.03 m/s y siendo la zona de menor diferencia a los desde 10 metros de profundidad hacia el fondo. Las velocidades meridionales muestran mayor variación en los patrones. Cuando observamos la simulación con viento, vemos la totalidad de la superficie con velocidades positivas (hacia el norte), mostrando velocidades negativas desde los 5 y 10 metros de profundidad hacia el fondo, mientras que sin viento, solo hay velocidades positivas cerca de Punta Lavapié (0km) por sobre los 10 metros de profundidad, en el resto de la sección (desde el kilómetro 1 hacia la Isla Santa María) las velocidades son negativas (hacia el sur). Se observa también que la magnitud en superficie con viento es mucho mayor a sin viento, llegando hasta 0.09 m/s en comparación a no más de 0.03 m/s. De esta manera, se muestran diferencias tanto en intensidad como en dirección (Fig. 3.3.6).

## 3.4. Perfiles

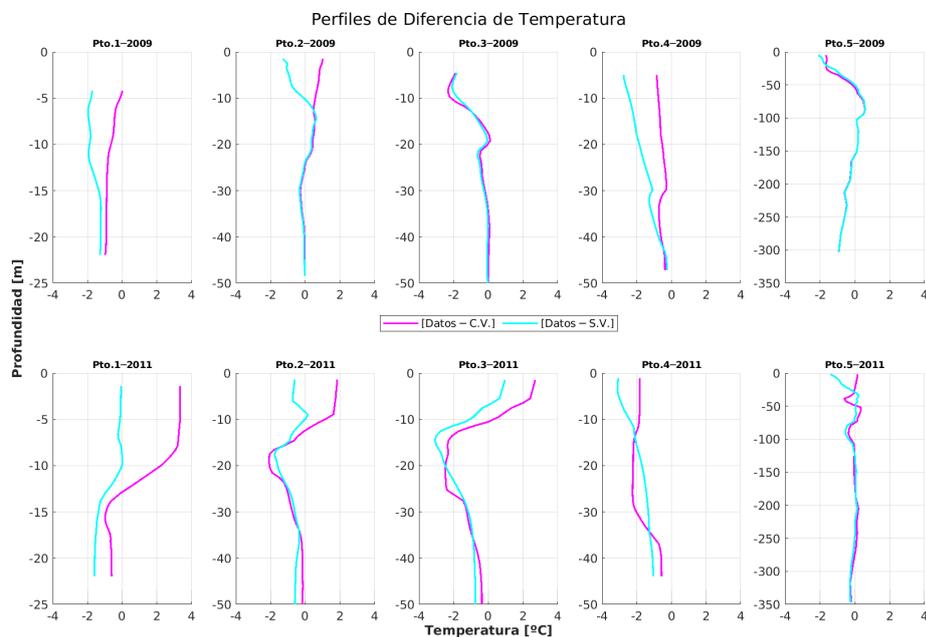
### 3.4.1. Temperatura

En los perfiles de temperatura, se observan los datos FIP para los años 2009 y 2011 (Tapia, 2010; Hidalgo, 2011) en cinco puntos del dominio (Fig. 2.4.1) los que se compararon con las salidas del modelo. En general, se puede notar que para el año 2009, las temperaturas registradas se asemejan más a la simulación con viento, que en los puntos 1, 3, 4 y 5 está por debajo de sus temperaturas. Al observar las diferencias (Fig. 3.4.2), notamos que en general, bajo los 20 metros de profundidad, las diferencias con los datos disminuyen para ambas simulaciones y estas oscilan entre  $-2$  y  $2^{\circ}\text{C}$ . Se destaca en el punto 5 que las diferencias disminuyen hasta los 50 y 100 metros de profundidad, pero desde los 100 a los 300 metros, vuelve a aumentar. Se observan también en los puntos 3 y 5 que las simulaciones muestran una termoclina, entre los 20 y 30 metros de profundidad y entre los 70 y 25 metros respectivamente. En estos puntos, los datos muestran termoclinas menos pronunciadas y a menor profundidad.



**Figura 3.4.1:** Perfiles de temperatura en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva roja representa los datos, la curva azul representa las salidas del modelo con viento y la curva verde representa las salidas del modelo sin viento.

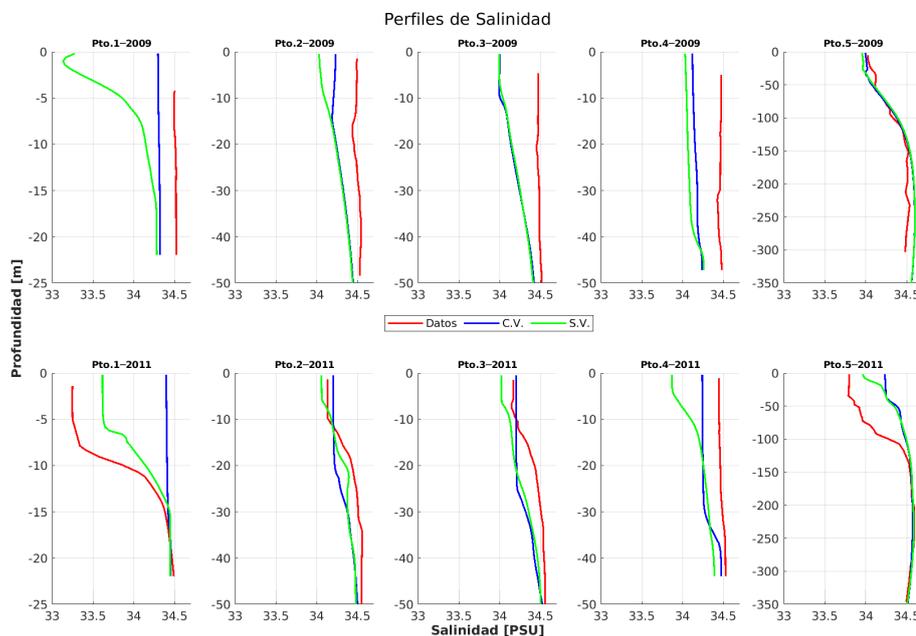
Para el año 2011, los datos muestran termoclinas claras y pronunciadas, las cuales suelen estar para los puntos 1, 2, 3 y 4, entre los 7 y 15 metros de profundidad aproximadamente. En estos puntos, las simulaciones muestran cambios de temperatura diferentes entre sí. La simulación con viento muestra termoclinas con pequeñas variaciones de temperatura y por debajo de los 15, 20 o 30 metros de profundidad. La simulación sin viento muestra termoclinas menos pronunciadas y los cambios se muestran en una profundidad mayor a los datos pero menor a la simulación con viento. Cabe destacar que los datos en superficie se asemejan más a la simulación sin viento en puntos cercanos a la costa y a la simulación con viento en puntos más cercanos a mar abierto. Observando las diferencias del año 2011 (Fig. 3.4.2), vemos diferencias mayores, que oscilan entre  $-4$  y  $4^{\circ}\text{C}$ . Las mayores diferencias se observan en las profundidades que presentan las termoclinas, y comparando con ambas simulaciones, las diferencias son mayores en la simulación con viento cerca de la costa, pero son mayores en la simulación sin viento en los puntos más lejanos.



**Figura 3.4.2:** Perfiles de diferencia de temperatura en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva magenta representa la diferencia entre los datos y el modelo con viento, la curva cian representa la diferencia entre los datos y el modelo sin viento.

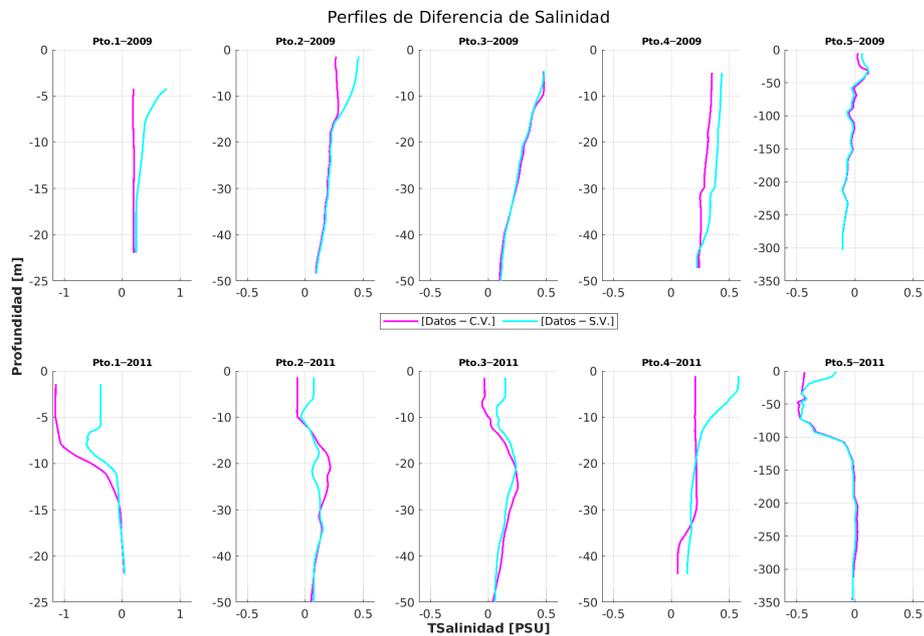
### 3.4.2. Salinidad

Para los mismos cinco puntos en los años 2009 y 2011, tenemos los perfiles de salinidad. Estos muestran para el año 2009 un valor casi constante a lo largo de la profundidad de 34.5 PSU en los cuatro puntos más cercanos a la costa y más lejano a los resultados de las simulaciones, que son menores. En el punto 5, las diferencias son menos notorias, donde los datos muestran en superficie mayor cercanía con las simulaciones, con salinidad de cerca de 34 PSU y va aumentando con la profundidad hasta los 34.5 PSU aproximadamente. Observando las diferencias (Fig. 3.4.4), vemos claramente que la simulación subestima los datos, en los puntos 1, 2, 3 y 4, estas diferencias oscilan entre los 0.1 y 0.7 PSU aproximadamente, siendo siempre mayor la diferencia con la simulación sin viento. En el punto 5, las diferencias son mucho menores y muestra una subestimación de los datos por sobre los 50 metros de profundidad, y una subestimación desde los 50 a los 300 metros. Se observa también en el punto 1, una pronunciada haloclina en la simulación sin viento, la que no está presente ni en los datos ni en la simulación con viento.



**Figura 3.4.3:** Perfiles de salinidad en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva roja representa los datos y la curva azul representa las salidas del modelo con viento y la curva verde representa las salidas del modelo sin viento.

Para el año 2011, los datos muestran mayor variación, en la columna de agua. En los puntos 1 y 5 se observan haloclinas pronunciadas, en los puntos 2 y 3 se observan variaciones de salinidad menores y en el punto 4 es casi constante en los 34.5 PSU. Los datos muestran más similitud con la simulación sin viento que tiene cambios de salinidad mayores, mientras que la variación de salinidad en la simulación con viento es de menor magnitud y suele ocurrir a mayor profundidad (como se observa en los puntos 2, 3 y 4). En el punto 5, los datos muestran una baja salinidad importante en los primeros 150 metros a diferencia de las simulaciones, que muestran un cambio importante por sobre los 50 metros de profundidad. Observando las diferencias (Fig. 3.4.4), vemos que los valores mayores los presenta la simulación con viento (a excepción del punto 4), en los puntos 1 y 5, las simulaciones sobreestimaron los valores de los datos cercanos a la superficie, mientras que en los puntos 2 y 3, las simulaciones subestimaron los datos entre los 10 y 50 metros de profundidad. Las diferencias oscilan entre -0.5 y 0.5 PSU en los puntos 2, 3, 4 y 5 y en el punto 1 se observan las diferencias mayores que son por sobre 1 PSU entre los datos y la simulación con viento.

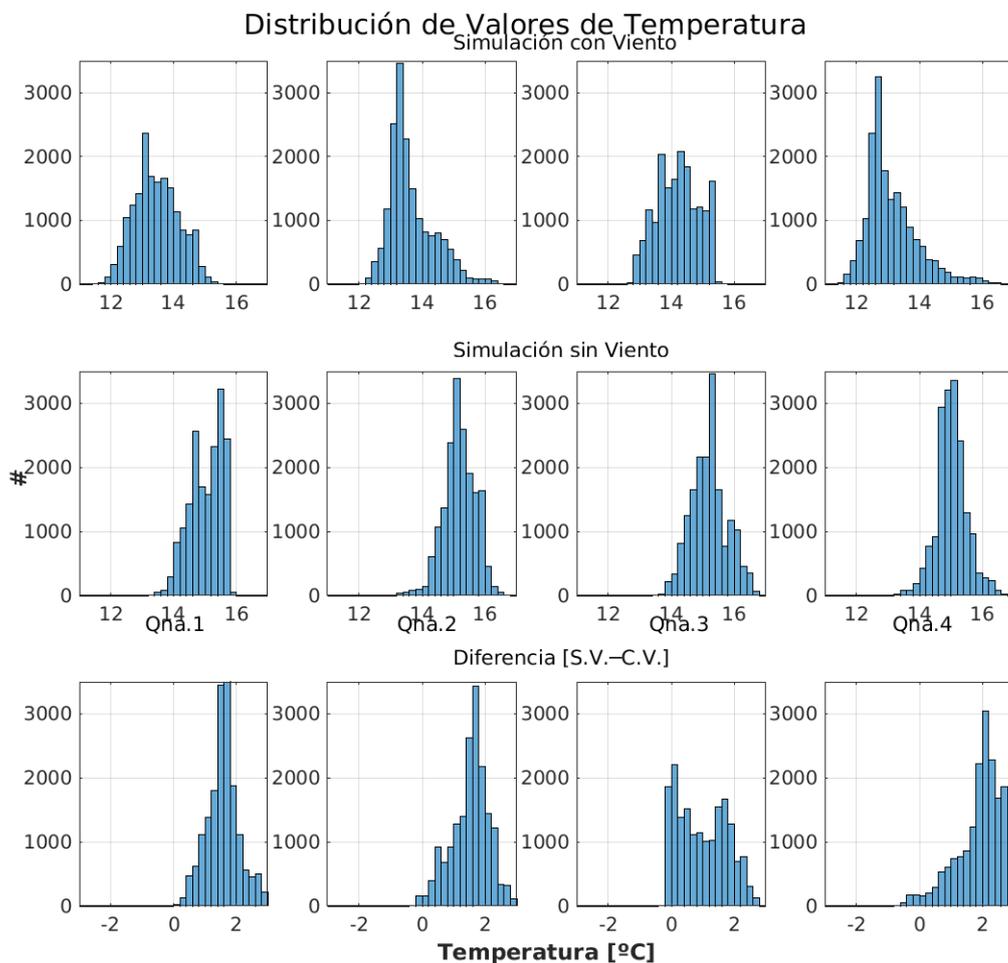


**Figura 3.4.4:** Perfiles de diferencia de salinidad en las posiciones 1, 2, 3, 4 y 5 para los años 2009 y 2011 (Fig. 2.4.1). La curva magenta representa la diferencia entre los datos y el modelo con viento y la curva cian representa la diferencia entre los datos y el modelo sin viento.

### 3.5. Histogramas

Para analizar la distribución de las variables en superficie, se realizaron histogramas de los promedios de temperatura, salinidad, U y V para las quincenas 1, 2, 3 y 4 (mostradas en los mapas superficiales de la sección 3.1), comparando la simulación con viento y sin viento y mostrando la distribución de las diferencias entre ambas con la operación [S.V.–C.V.].

#### 3.5.1. Temperatura

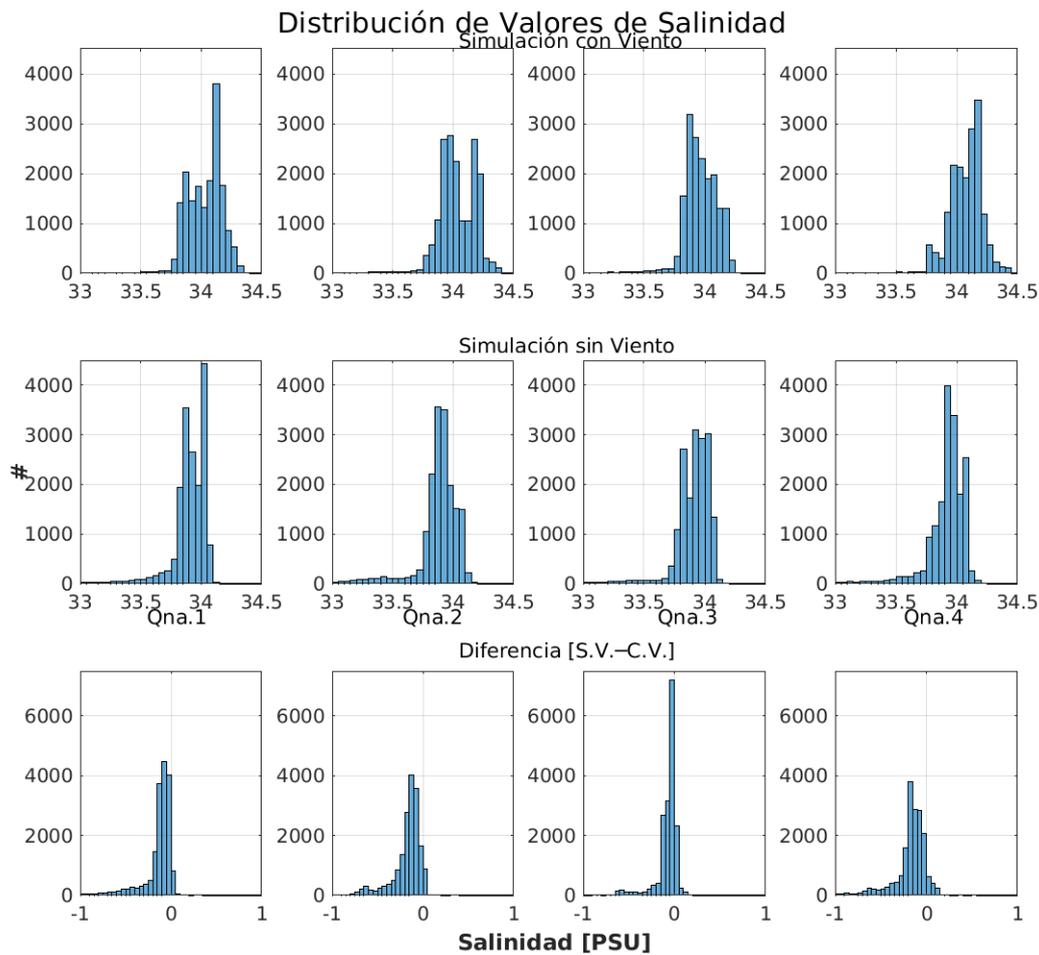


**Figura 3.5.1:** Distribución de los valores de temperatura en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones.

Observando los histogramas de la simulación con viento, vemos que los valores se concentran entre 12 y 14°C en su mayoría y algunos pocos puntos llegan a los 16°C. Los valores al rededor de los 13°C son más frecuentes. Las quincenas 2 y 4 muestran distribuciones asimétricas hacia la izquierda, es decir, son más los valores de temperatura menores a 13°C que mayores. En las quincenas 1 y 3, la distribución es más simétrica. En la simulación sin viento, los valores se concentran entre 14 y 16°C y los valores cercanos a los 15°C son más frecuentes. En la primera quincena, la distribución es asimétrica hacia la derecha, es decir, predominan las temperaturas cercanas a 16°C, mientras que en las quincenas 2, 3 y 4, la distribución se concentra más en los 15°C. Las diferencias son casi en su totalidad positivas, siendo más frecuentes las cercanas a 2°C. En la tercera quincena, los valores de temperatura de la simulación con viento aumentan y muestra una distribución y ubicación distinta a los otros mapas. Así, las diferencias con la simulación sin viento son más bajas, siendo más frecuentes cerca de los 0°C.

### 3.5.2. Salinidad

Los histogramas de la simulación con viento muestran una mayor concentración entre 33.7 y 34.3 PSU aproximadamente. En la primera y cuarta quincena, los valores más frecuentes son los cercanos a 34.15 PSU, en la segunda quincena, se observan dos frecuencias altas, una entre los 33.9 y 34 PSU y otra cercana a los 34.2 PSU. En la tercera quincena, se observan valores cercanos a 33 PSU, pero con mayor frecuencia los valores cercanos a 33.8 PSU. En cuanto a la simetría de estas distribuciones, no muestran una forma bien definida. Por otro lado, la simulación sin viento muestra más valores por debajo de los 34 PSU y distribuciones asimétricas hacia la derecha más definidas, donde los valores llegan hasta los 33 PSU. En las diferencias, observamos que en la gran mayoría de los puntos, las diferencias están entre -0.3 y 0 PSU, y se aprecian distribuciones asimétricas hacia la derecha, donde predominan las diferencias negativas (donde la simulación con viento presentaba una mayor salinidad en general). pero más cercanas a 0 PSU. Se puede apreciar nuevamente, que en la tercera quincena muestra mayor similitud entre ambas simulaciones, donde la más alta frecuencia se ubica entre los -0.05 y 0 PSU.

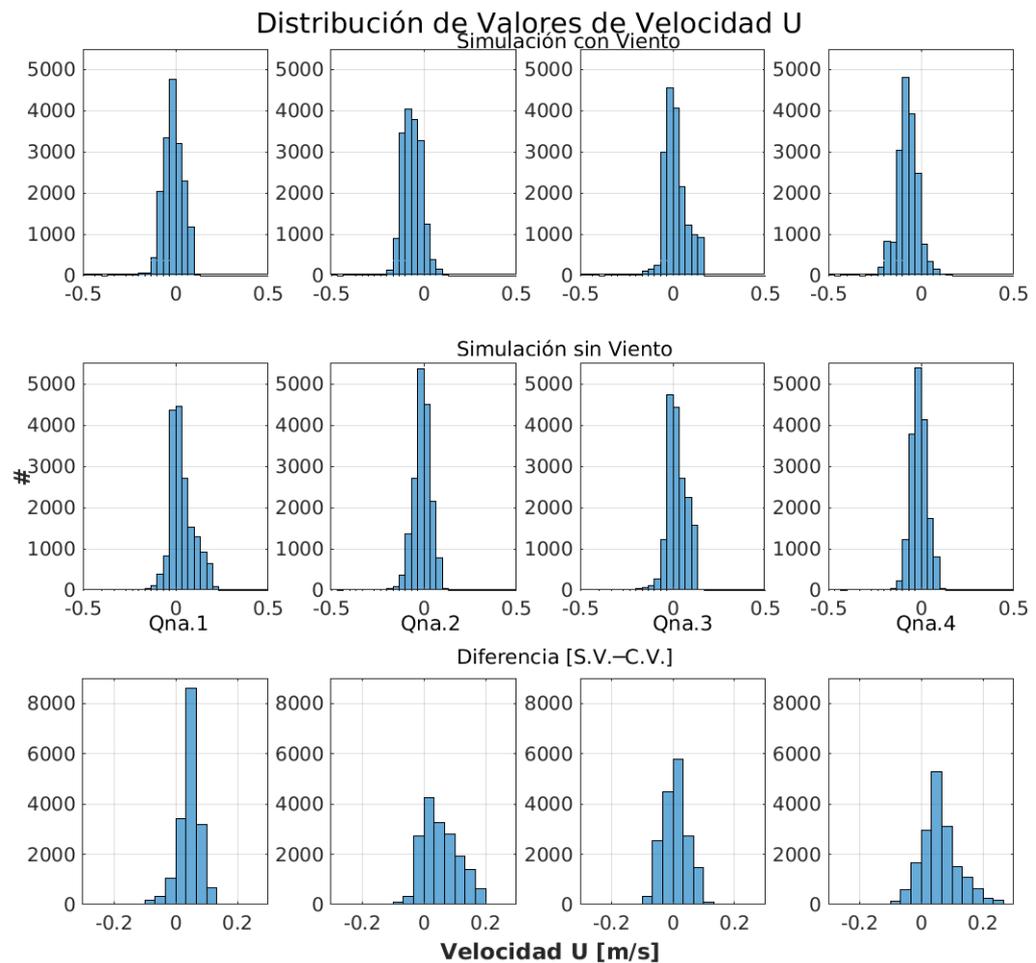


**Figura 3.5.2:** Distribución de los valores de salinidad en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones.

### 3.5.3. Velocidades

La velocidad zonal presenta valores que rodean  $\pm 0.2$  m/s, en donde la simulación con viento muestra mayores frecuencias en velocidades hacia el oeste y una cantidad mínima de puntos tienen magnitudes mayores y hacia el este. Mientras, en la simulación sin viento no se observa que predominen velocidades positivas o negativas y las mayores frecuencias están en velocidades menores a  $\pm 0.2$  m/s. Las diferencias que muestran los puntos pueden indicar dos cosas: diferencia en la magnitud y/o diferencia en la dirección. Observamos que en las quincenas 1,2 y 4, las diferencias son frecuentemente positivas. Dado que la diferencia realizada es

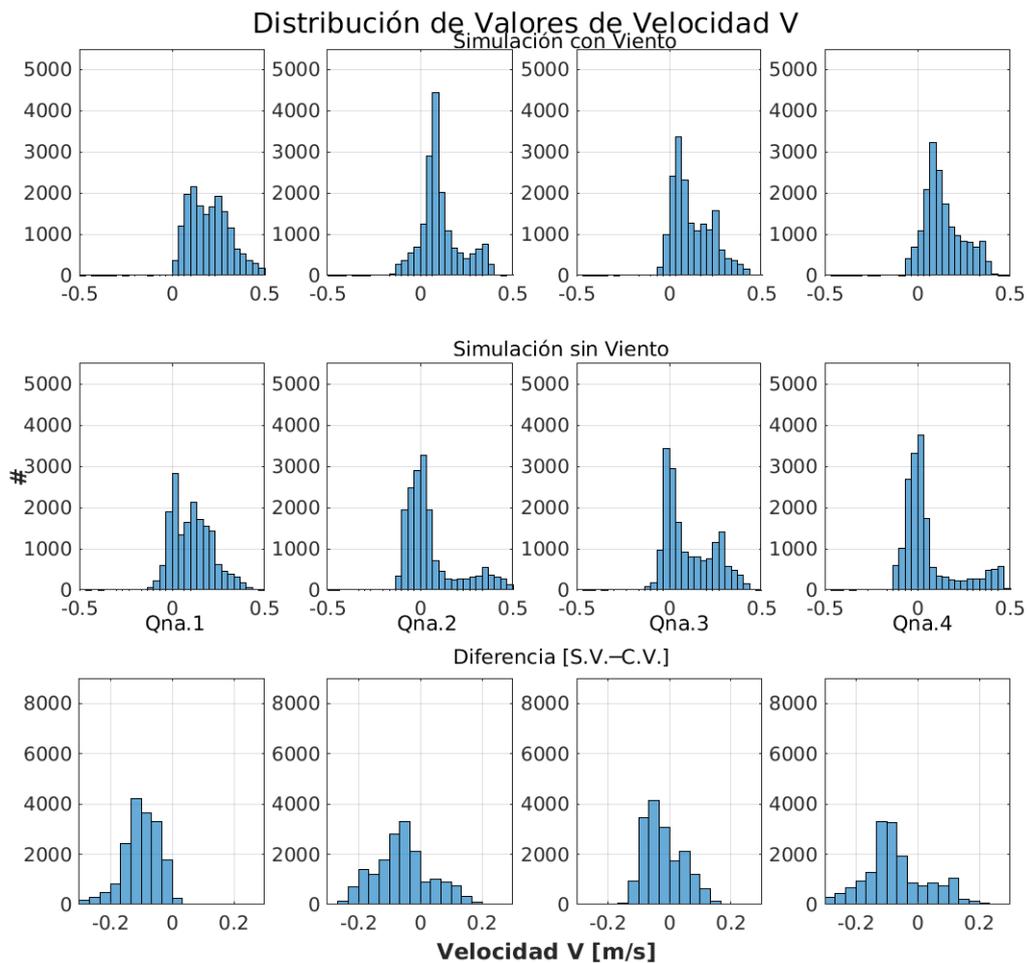
[S.V.–C.V.], lo que mayormente podría suceder es que la velocidad hacia el oeste sea más intensa en la simulación con viento que en la sin viento, o bien, que en el mismo punto, ambas simulaciones fueron en una dirección opuesta. Se puede destacar nuevamente que en la tercera quincena, los valores de ambas simulaciones se asemejaron más.



**Figura 3.5.3:** Distribución de los valores de velocidad U en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones.

Por otro lado, la velocidad meridional muestra velocidades de  $\pm 0.5$  m/s, donde predominan en ambas simulaciones las velocidades positivas y con distribuciones similares, sin embargo, las diferencias tienen valores más variados, de  $\pm 0.25$  m/s. En la primera quincena, las diferencias se concentran en valores negativos,

que, si observamos las distribuciones de ambas simulaciones, el principal factor de diferencia es la magnitud de las velocidades. En las quincenas 2, 3 y 4, las diferencias son más variadas, se pueden observar cambios tanto de dirección como de magnitud en las velocidades, mostrando diferencias en un rango más reducido en la tercera quincena.



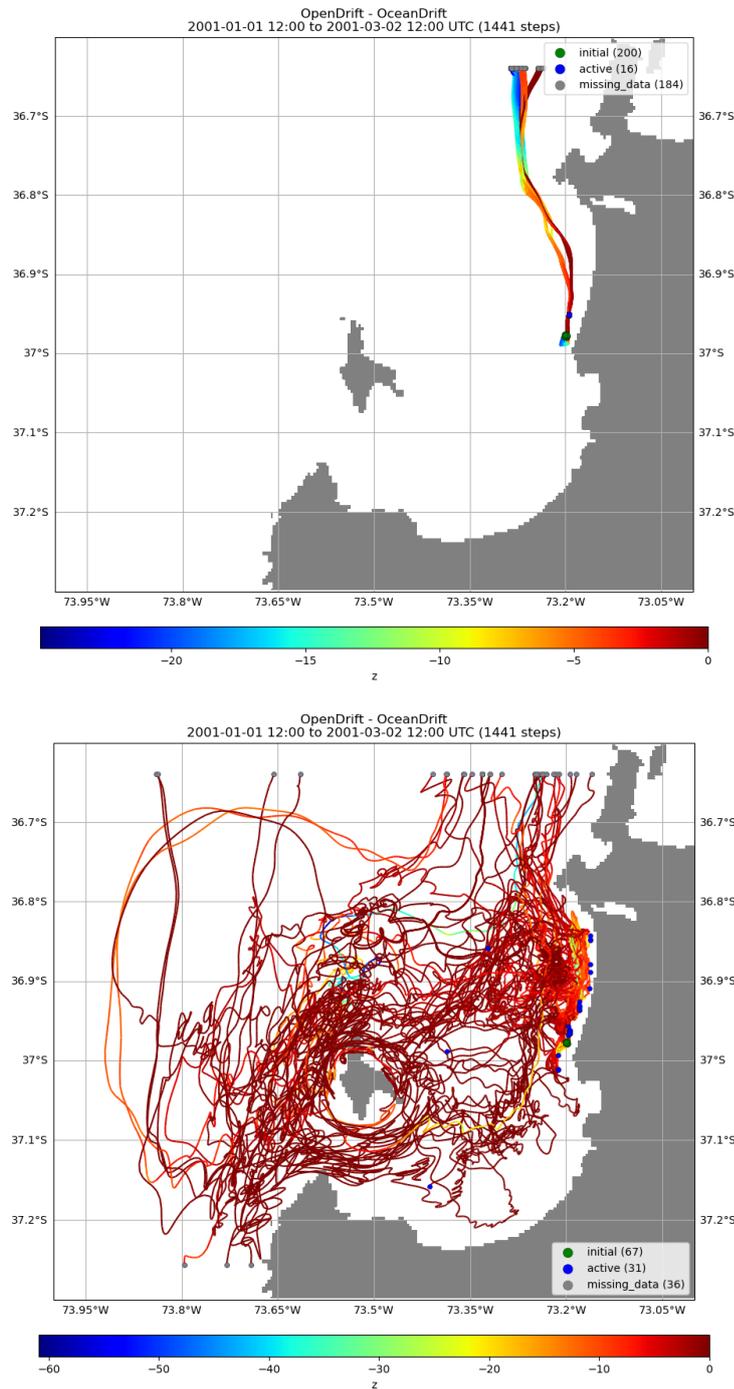
**Figura 3.5.4:** Distribución de los valores de velocidad V en superficie. La primera fila muestra las quincenas para la simulación con viento, la segunda fila para la simulación sin viento y la tercera fila para las diferencias entre ambas simulaciones.

### 3.6. Partículas

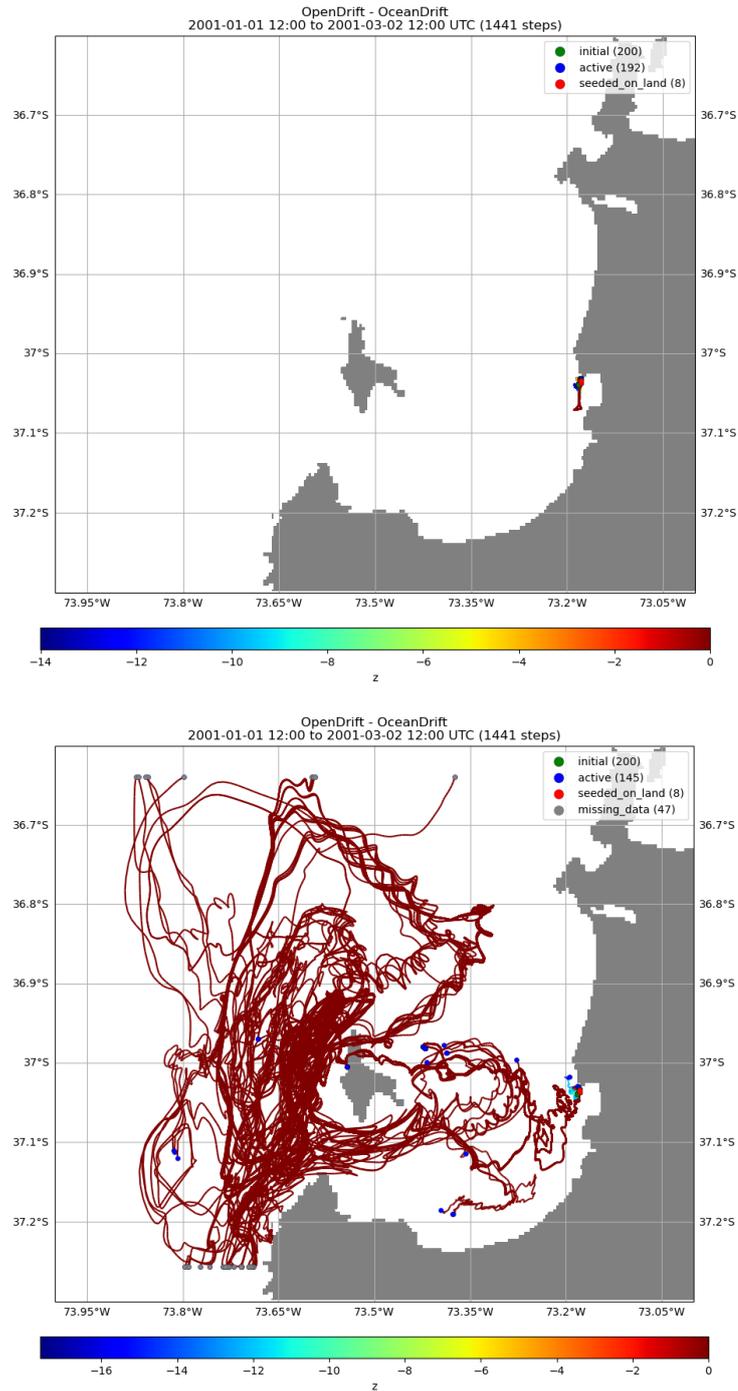
Las partículas se liberaron en cuatro puntos, correspondientes a los emisarios ubicados en la zona. Los gráficos muestran la trayectoria de las partículas provenientes de cada emisario por separado, tomando las salidas de la simulación con viento y sin viento. Observamos la trayectoria de las partículas desde el emisario Coronel Norte en un escenario con viento (Fig. 3.6.1). Estas parten de una profundidad cercana a los 20.9 metros y tienen una dirección bien definida hacia el norte. Algunas partículas se mantienen cerca de la superficie y el otro va hundiéndose a medida que se aleja del emisario y sale del golfo. Cuando no hay presencia del viento, vemos una trayectoria más errática. Al salir del emisario, las partículas muestran trayectorias muy variadas, se alejan y se devuelven al golfo, algunas se dirigen hacia el norte y otras llegan al sur del dominio fuera del golfo, llegando a profundidades entre 0 y 20 metros dentro, fuera de este, llegan hasta cerca de 50 metros de profundidad.

Para las partículas provenientes del emisario Coronel Sur vemos los casos con viento y sin viento (Fig. 3.6.2). En el primer caso, las partículas no se mueven lejos de la costa. Parten desde una profundidad cercana a los 12.15 metros y se mueven entre las costas de Coronel y Lota manteniéndose cerca de la superficie. En ausencia del viento, las partículas tienen trayectorias onduladas, avanzan con movimientos circulares y se dirigen en su mayoría hacia el oeste. Algunas de las partículas se quedan dentro del golfo, otras al oeste de la Isla Santa María, y el resto se pierde mar adentro en los bordes norte o sur del dominio. Estas partículas se mueven constantemente cerca de la superficie.

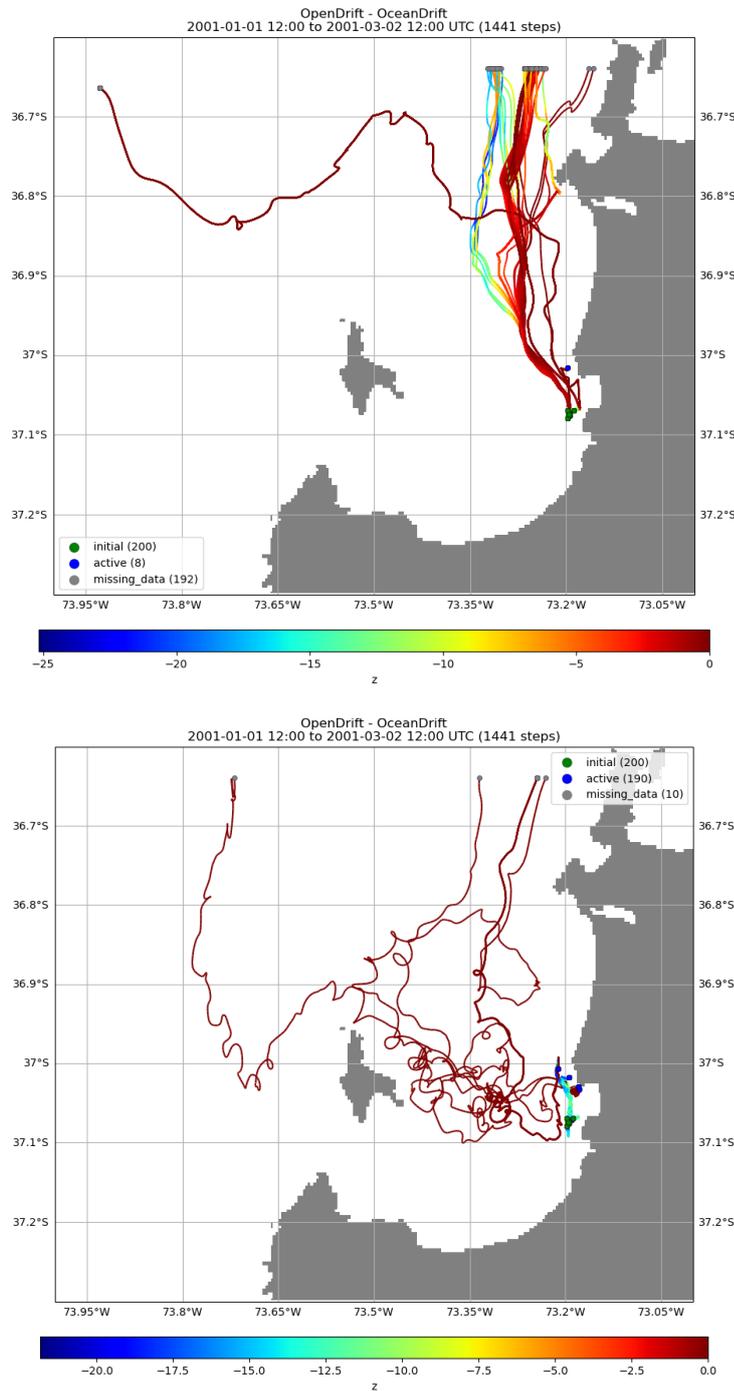
En los mapas de trayectoria para las partículas liberadas en el emisario Lota (Fig. 3.6.3), cuando tenemos la presencia normal del viento, las partículas salen del golfo con dirección hacia el norte. Parten desde una profundidad cercana a 17.8 metros, generalmente, se mantienen cerca de la superficie aquellas partículas que viajan más cerca de la costa, mientras que más al oeste, las partículas suelen hundirse hasta los 10 o 20 metros. Una cantidad ínfima de partículas se queda dentro del golfo, algunas pueden perderse mar adentro. En un caso sin viento, las partículas avanzan con movimientos circulares, la mayoría se mantiene dentro del golfo cerca de la superficie y algunas logran salir avanzando hacia el norte.



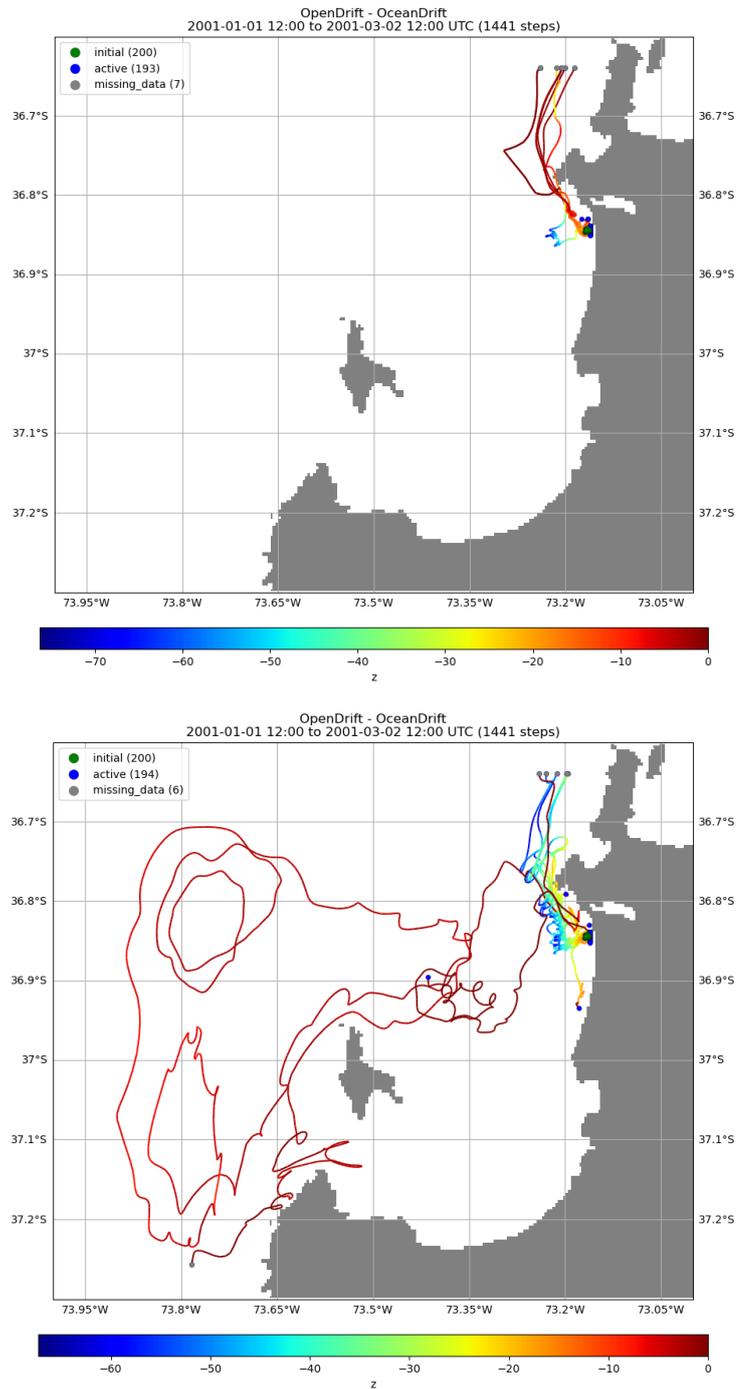
**Figura 3.6.1:** Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario Coronel Norte con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas.



**Figura 3.6.2:** Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario Coronel Sur con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas.



**Figura 3.6.3:** Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario Lota con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas.



**Figura 3.6.4:** Trayectoria de partículas liberadas desde el emisario San Pedro con viento y sin viento respectivamente. Los colores representan la profundidad que alcanzan las partículas en cada punto. Los puntos verdes muestran el punto inicial de las partículas, los azules muestran las partículas activas y los grises las partículas perdidas.

Las trayectorias de las partículas liberadas en el emisario San Pedro (Fig. 3.6.4) a 19.7 metros de profundidad aproximadamente, muestra que, con la presencia del viento, algunas de las partículas salen del golfo hacia el norte a poca profundidad, como también, se hunden hasta cerca de los 60 a 70 metros de profundidad para luego salir y la mayoría de las partículas se mantienen cerca del punto de liberación. En un caso sin viento, gran parte de las partículas se quedan en la orilla, las que logran salir dirigiéndose al norte, se hunden hasta cerca de los 50 a 60 metros con movimientos circulares. Algunas se trasladan dentro dentro y fuera del golfo, pudiendo llegar al sur del dominio llegando a profundidades no mayores de 20 metros.

# Capítulo 4

## Discusión

Para validar este experimento se tuvo cierta flexibilidad, como en el caso de las variables en superficie, se compararon entre sí los escenarios con viento y sin viento. Se compararon los datos de marea (SHOA, 2014) con las salidas de la simulación con viento en el punto M (Fig. 2.4.1). Se usó de referencia una sección vertical de diciembre en Boca Grande, tomada de literatura (Valle-Levinson et al., 2003). Se compararon las salidas de temperatura y salinidad con datos FIP (Hidalgo, 2011) de perfiles dentro de la zona tomados en diferentes fechas. Esta validación contaba con una condición: que los datos o valores de referencia representaran alguna fecha de verano (diciembre, enero, febrero), sin importar el año. Los valores de las variables estudiadas eran cercanos a los característicos de la zona en verano para la simulación con viento. Con estos resultados en mente, las partículas fueron liberadas en la ubicación de cada emisario.

### 4.1. Datos, literatura y modelo

Se utilizaron datos de marea, perfiles verticales y un gráfico de sección vertical en Boca Grande, lo siguiente fue comparar las diferencias entre ambas simulaciones, con viento y sin viento. Una de las partes más importantes de esta validación era evaluar la marea, donde se compararon las salidas del modelo con datos del SHOA de nivel del mar en un punto de Coronel (SHOA, 2014). Se observaron las diferencias de nivel del mar y marea astronómica, las cuales muestran valores de máximo 0.53 m, estos valores se concentran entre -0.2 y 0.2 m para ambas diferencias (Fig. A0.3). Los valores de las amplitudes de M2 y S2 de los datos

y el modelos fueron de 0.46 m y 0.45 m para M2 y de 0.18 m y 0.17 m para S2 (tabla 3.2.1), dando una diferencia de 1 cm para M2 y S2 respectivamente. Las salidas de CROCO tienen valores levemente inferiores con respecto a los datos. De igual manera, los diagramas de frecuencias muestran valores similares para los constituyentes principales con un 95 % de significancia (Fig. 3.2.2 y 3.2.3), es decir, la marea está bien representada.

Observando los perfiles, vemos más variabilidad entre los datos y ambas simulaciones. En el año 2009, vemos perfiles de temperatura (Fig. 3.4.1) en donde la simulación con viento muestra menos diferencia con los datos que la simulación sin viento, la cuales no suelen ser mayores a los  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  (Fig. 3.4.2), mientras que la simulación sin viento muestra un claro calentamiento en las capas superficiales. Sin embargo, al observar los perfiles del año 2011, vemos diferencias mucho mayores con la simulación con viento que con la sin viento, sobretodo cerca de la costa (puntos 1, 2 y 3). La simulación sin viento se asemeja más a los datos, mientras que la simulación con viento muestra valores de temperatura mucho menores. Este comportamiento se puede deber a los datos de esfuerzo del viento ASCAT, cuyos valores son mayores a lo normal de la zona (como se menciona en Vergara et al. (2023)), esto provoca una mayor surgencia, obteniendo temperaturas más frías en la superficie. En los perfiles de salinidad para el 2009 se observa mayor similitud entre los datos y la simulación con viento. En los puntos cercanos a la costa, podemos ver una baja salinidad en la simulación sin viento, esto debido a que, al no tener el esfuerzo del viento, ya no se observa la pluma de baja salinidad hacia el norte, sino que el agua dulce del río se extiende zonalmente, resultando una menor salinidad en todo el golfo. Para los perfiles del año 2011, vemos que en el punto más cercano a la costa, la simulación con viento tiene una salinidad que no varía mucho en la columna, siendo muy salada en la superficie, en comparación a los datos. En los puntos intermedios, la salinidad se asemeja más a los datos, por lo que esta diferencia abrupta en la costa podría deberse o a la mayor surgencia del modelo por los datos ASCAT, o debido a que, al ser un punto muy costero, no se resuelve del todo bien debido a la topografía del modelo. Por último, se tiene la sección vertical en Boca Grande validada con la figura A0.2 que muestra la salinidad, temperatura y densidad para el 6 de diciembre del año 2000. Lo importante de esta figura de Valle-Levinson et al. (2003) es comparar los rangos característicos de verano para esta zona y compararlos con

la simulación con viento 3.3.1, ya que tiene más sentido físico. En general, se puede observar que la simulación es menos salina (diferencias  $\leq 0.2$  PSU), con más temperatura (diferencias  $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ) y menos densa (diferencias  $\leq 0.4$  kg/m). Tomando en cuenta que son distintos meses y distintos años, las diferencias son bastante razonables para un verano. Si se compara con la representación de verano de Contreras (2017), las corrientes muestran el mismo comportamiento. Se observa un rango de velocidades entre 15 y 25 cm/s predominantemente hacia el norte, y mostrando una doble capa en Boca Grande. La corriente en superficie se dirige hacia el norte con valores que bordean los 15 cm/s y disminuye su intensidad a medida que aumenta la profundidad, también los rangos de temperatura entre  $10^{\circ}$  y  $14^{\circ}\text{C}$  y de salinidad entre 33.7 y 34.4 PSU son similares.

## 4.2. Con viento vs Sin viento

El viento tiene un papel muy importante en la física del océano. Es de los factores principales que influyen en las corrientes oceánicas en superficie, lo que también está ligado a los cambios de temperatura. Debido a la mezcla de agua profundas con aguas superficiales producida por el viento, la superficie se enfría. Al quitar el viento, la marea sería uno de los forzantes más importantes en la circulación. Otros factores que se mantendrían presentes y que influyen en la variación de las corrientes son las diferencias de presión atmosférica, teniendo sistemas de altas y bajas presiones. Los cambios de temperatura, que pueden estar ligados a la radiación solar y a la estación del año. También las descargas de agua dulce, que generan movimiento debido a las diferencias de densidad que hay entre el agua proveniente de los ríos y el agua salada.

Ya que el viento puede generar olas, turbulencia y transferir momentum a través de la fricción en la superficie (lo que da lugar a corrientes superficiales), al quitar el estrés del viento, se produciría un debilitamiento importante en la circulación (Fig. 3.1.5). Las velocidades se vuelven más lentas y erráticas y cambia la salinidad superficial, debido a que corrientes son más débiles y no se genera la pluma de agua dulce típica de la zona. Debido a esto, el agua de baja salinidad solo se extendería zonalmente desde la desembocadura.

Se puede observar una clara diferencia en la trayectoria de las partículas cuando hay y cuando no hay viento. La circulación forzada por el viento en promedio tiene

una dirección hacia el norte dentro del golfo, de igual manera, las partículas se dirigen hacia el norte y se demoran cerca de dos semanas en salir del dominio, lo que también se observó en Contreras (2017) a excepción de las partículas liberadas en Coronel Sur (Fig. 3.6.2). En cambio, cuando la circulación no es forzada por el viento, sino que se ve influenciada en mayor medida por la descarga del río, las partículas viajan lentamente y se dispersan por todo el dominio, donde muchas de ellas se mueven en círculos sin poder salir de la zona en el periodo de 60 días que tiene la simulación.

### 4.3. ¿Influye el viento?

Teniendo estos resultados, queda responder la pregunta de estudio: ¿influye en viento en la deriva de partículas? Sí, el viento influye de manera importante. En el periodo estudiado, el viento fuerza una circulación que ayudaría a las partículas a salir del golfo. Si el viento no estuviera presente, las partículas viajarían lentamente y tenderían a quedarse dentro del golfo. Si hablamos con respecto a la temperatura, suponiendo que las partículas tienen características de coliformes fecales, observamos que a pesar de que existe un calentamiento considerable de temperatura, estas no alcanzarían un rango que le impidieran a las bacterias sobrevivir (tomando en cuenta solo los dos meses de simulación). Por otro lado, la trayectoria de partículas muestran que aún con viento, es posible que no todas las partículas se alejen de la costa, lo que podría estar relacionado a la batimetría del modelo.

Para lograr el objetivo general de esta investigación, que buscaba estudiar la influencia del viento en la deriva de partículas al interior del Golfo de Arauco, se establecieron 4 objetivos específicos. El objetivo N°1 se logró con las simulaciones de dos meses. Se seleccionó como periodo de estudio el verano, época del año con más movimiento turístico y/o recreativo en la zona, donde puede ser más frecuente el contacto directo con la contaminación. Se agregó el efecto de mareas, la cual fue bien representada por el modelo. Se agregó el caudal del río Biobío, donde se obtuvieron valores de salinidad razonables para el escenario con viento. También se logró obtener el escenario sin viento para el periodo estudiado. El objetivo N°2 se llevó a cabo con la comparación de ambos escenarios, donde se captaron claramente las diferencias entre los dos escenarios tanto en la circulación

como en la temperatura y salinidad. Se pudo determinar en qué medida el viento afectaba la circulación, las corrientes se volvieron más débiles y ya no mostraban un patrón definido. El objetivo N°3 se logró utilizando el modelo OpenDrift, donde las trayectorias fueron muy distintas entre una simulación y otra. Se observaron trayectorias concordantes con el análisis de las corrientes que se hizo previamente. Finalmente, el objetivo N°4 se cumple al identificar como uno de los principales forzantes al viento en ambas simulaciones. Se logra determinar que en la simulación con viento, la trayectoria de gran parte de las partículas que se van hacia el norte fuera del golfo debido a que la circulación es forzada por el viento que es predominantemente hacia el norte en verano. Por otro lado, en la simulación sin viento, la circulación es débil y errática, donde recircula dentro del golfo y provoca que la mayoría de las partículas de pueda salir hacia mar adentro. Las principales limitaciones de este análisis se deben a la simpleza del experimento. Un factor importante fueron los datos de ASCAT usados en la simulación grande, que nos entrega vientos más fuertes de lo normal. Tampoco se integró un modelo biogeoquímico a las simulaciones y las partículas no tienen ninguna característica biológica con la que pudiese haber interactuado. Si bien la motivación de este estudio surgió para estudiar la contaminación por desechos domésticos, el experimento no representa más que partículas a la deriva. Aún con estas desventajas, el estudio cumplió con sus objetivos. Se analizó la trayectoria de las partículas, sin embargo, existen algunas limitaciones tomando en cuenta la motivación. En un estudio futuro, podría generarse una simulación más realista, que además de mareas y ríos, se incorpore un modelo biogeoquímico. Idealmente, que el modelo simule por más tiempo, pues cabe la posibilidad de que la simulación sin viento también necesitara un periodo transiente para tener resultados más significativos. De esta manera se podría observar un mayor (o menor) calentamiento en la superficie, y se podría analizar el comportamiento en invierno, donde el caudal del río Biobío es mucho mayor. Por otro lado, las partículas también podrían definirse como algún contaminante, ya sea doméstico o industrial y que puedan tener interacción con los componentes biológicos y químicos que se le agreguen en el modelo oceánico.

## Capítulo 5

### Conclusión

La principal motivación de este experimento fue el estudio de la dispersión de desechos al interior del Golfo de Arauco. Para ello, el principal foco de la investigación fue estudiar la influencia del viento en la dispersión de partículas. El estudio consistió en analizar los cambios en la circulación de la zona bajo distintos escenarios. Para ello se utilizó el modelo CROCO, con el cual se realizó un anidado con una resolución de  $\sim 0.83\text{km}$  en la zona del GA a partir de la simulación de Vergara et al. (2023). Con los forzantes de la simulación grande, se generaron dos simulaciones, una con viento y otra sin viento, las cuales incluyen el efecto de las mareas y una descarga constante del río Biobío de  $200\text{ m}^3/\text{s}$ . La simulación sin viento se obtuvo luego de volver cero los valores de estrés del viento en los forzantes atmosféricos. Se simularon dos meses de verano con salidas horarias y luego se liberaron partículas en las ubicaciones de los 4 emisarios submarinos de la zona utilizando OpenDrift.

Para analizar las salidas del modelo, se compararon las series de marea de la simulación con viento y los datos del SHOA, donde se obtuvieron diferencias predominantemente menores a  $20\text{cm}$  en las series de tiempo y menores a  $1.4\text{cm}$  en las amplitudes de M2 y S2. Es decir, el modelo representó bien la marea de la zona. Se compararon perfiles de datos FIP de los años 2009 y 2011, donde se observó una superficie fría en la simulación con viento, es decir, una alta surgencia, probablemente debido a los fuertes vientos de los datos ASCAT que forzaron el modelo. Esto también se pudo observar en el estudio de la simulación grande (Vergara et al., 2023). En general, se observó que la simulación sin viento

aumentó su temperatura en superficie, ya que sin viento, no hubo mezcla de agua ni surgencia, donde el agua fría del fondo subiera. También disminuyó la salinidad dentro del golfo, debido a que al dejar de ser el viento el principal forzante de la circulación, la descarga del río Biobío se extendió zonalmente y no se formó la pluma de baja salinidad dirigida hacia el norte. Al quitar el principal forzante de la circulación, la magnitud de las velocidades disminuyen considerablemente y presentan patrones erráticos, formando pequeños vórtices lentos y en todo el interior del golfo. Los principales forzantes pasaron a ser la marea, las diferencias de temperatura generadas por radiación solar, las diferencias de presión atmosférica y las diferencias de densidad provocadas por el agua dulce del río.

Al liberar las partículas, hubieron resultados muy distintos entre una y otra simulación. Con viento, las partículas, al seguir la circulación forzada por el viento, en su mayoría se dirigían hacia el norte del dominio y se demoraban aproximadamente dos semanas en salir, a excepción de las partículas del emisario Coronel Sur, donde se mantuvieron cerca de la costa. Sin viento, las partículas se mantenían al interior del golfo, dando vueltas en círculos y a veces al rededor de la Isla Santa María. Algunas lograban salir a mar abierto manteniendo un movimiento circular y el resto se quedaban en el dominio durante los dos meses de simulación. Con todo esto se concluye que el viento sí es un factor importante en la dispersión de partículas en la zona de estudio. El viento en verano ayuda a que las partículas puedan abandonar la bahía. De otra manera, las partículas se tardarían más en salir del golfo o quizá no podrían hacerlo. Si el viento no estuviese presente, la circulación dependería de factores que influyen de maneras más sutiles en las corrientes, resultando corrientes más lentas y sin un patrón definido.

## Bibliografía

- Aguirre, C., Rojas, M., Garreaud, R. D., and Rahn, D. A. (2019). Role of synoptic activity on projected changes in upwelling-favourable winds at the ocean's eastern boundaries. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1):44.
- Ancapichún, S. and Garcés-Vargas, J. (2015). Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile. *Ciencias marinas*, 41(1):1–20.
- Andruszkiewicz, E. A., Koseff, J. R., Fringer, O. B., Ouellette, N. T., Lowe, A. B., Edwards, C. A., and Boehm, A. B. (2019). Modeling environmental DNA transport in the coastal ocean using Lagrangian particle tracking. *Frontiers in Marine Science*, page 477.
- Arakawa, A. and Lamb, V. R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *General circulation models of the atmosphere*, 17(Supplement C):173–265.
- Arrizaga, A., Chong, J., and Oyarzún, C. (1991). Evolución de las principales pesquerías de la VIII Región: la pesquería del Golfo de Arauco. In: Gestión Ambiental de los Recursos Hídricos Continentales y Marinos, y Planificación Territorial. v.A. Gallardo (Ed.). *Proyecto EULA*, pages 27–29.
- Braga, E. S., Bonetti, C. V., Burone, L., and Bonetti Filho, J. (2000). Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the Baixada Santista Estuarine System–Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 40(2):165–173.
- Cambon, G., Marchesiello, P., Penven, P., Debreu, L., Benshila, R., and Jullien, S. (2022). CROCO User Guide. <https://data-croco.ifremer.fr/DOC/model-v1.3.pdf>.
- Castillo Pizarro, J., Córdova Masanes, J., Lillo Vega, S., and Barbieri Bellolio, M. (1996). Informe final FIP No. 95-08. Evaluación hidroacústica de los recursos anchoveta y sardina común en la zona centro sur.
- Castro, L., Quiñones, R., Arancibia, H., Figueroa, D., Roa, R., Sobarzo, M., and Retamal, M. (1997). Áreas de desove de anchoveta y sardina común en la zona central. *Final Report Project FIP*, 96.
- Castro, L. R., Troncoso, V. A., and Figueroa, D. R. (2007). Fine-scale vertical

- distribution of coastal and offshore copepods in the Golfo de Arauco, central Chile, during the upwelling season. *Progress in Oceanography*, 75(3):486–500.
- Clavel-Henry, M., North, E. W., Solé, J., Bahamon, N., Carretón, M., and Company, J. B. (2021). Estimating the spawning locations of the deep-sea red and blue shrimp *Aristeus antennatus* (Crustacea: Decapoda) in the northwestern Mediterranean Sea with a backtracking larval transport model. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 174:103558.
- Contreras, J. (2017). Circulación del Golfo de Arauco y patrones de dispersión y residencia de contaminantes asociados a emisarios submarinos. *Tesis, Universidad de Concepción*.
- Craig, D., Fallowfield, H. J., and Cromar, N. (2002). Enumeration of faecal coliforms from recreational coastal sites: evaluation of techniques for the separation of bacteria from sediments. *Journal of Applied Microbiology*, 93(4):557–565.
- Crivellaro, M. S. et al. (2022). Contribuições para o controle da invasão por *Tubastraea coccinea* na Reserva Biológica Marinha do Arvoredo. *Tese, Universidade Federal de Santa Catarina*.
- Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., and Ådlandsvik, B. (2018). OpenDrift v1. 0: a generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development*, 11(4):1405–1420.
- Daneri, G., Dellarossa, V., Quiñones, R., Jacob, B., Montero, P., and Ulloa, O. (2000). Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Marine Ecology Progress Series*, 197:41–49.
- Davies, C. M., Long, J. A., Donald, M., and Ashbolt, N. J. (1995). Survival of fecal microorganisms in marine and freshwater sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(5):1888–1896.
- Debreu, L., Vouland, C., and Blayo, E. (2008). AGRIF: Adaptive grid refinement in Fortran. *Computers & Geosciences*, 34(1):8–13.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, d. P., et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656):553–597.
- Dugstad, J. S., Koszalka, I. M., Isachsen, P. E., Dagestad, K.-F., and Fer, I. (2019). Vertical structure and seasonal variability of the inflow to the Lofoten Basin inferred from high-resolution Lagrangian simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12):9384–9403.
- Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2):183 – 204.

- Figueroa, R., Bonada, N., Guevara, M., Pedreros, P., Correa-Araneda, F., Díaz, M. E., and Ruiz, V. H. (2013). Freshwater biodiversity and conservation in mediterranean climate streams of Chile. *Hydrobiologia*, 719(1):269–289.
- Fortt, A. and de Oceana, I. A. (2007). Emisarios submarinos: El mar no es un retrete. *OCEANA*.
- Fuenzalida, R., Schneider, W., Garcés-Vargas, J., Bravo, L., and Lange, C. (2009). Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16):992–1003.
- Garcés-Vargas, J. and Abarca-del Río, R. (2012). The surface heat fluxes along the eastern Pacific coast from 10 N to 40 S. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 62(2):71.
- Garreaud, R., Rutllant, J., and Fuenzalida, H. (2002). Coastal lows along the subtropical west coast of South America: Mean structure and evolution. *Monthly Weather Review*, 130(1):75–88.
- Gérigny, O., Pedrotti, M.-L., El Rakwe, M., Brun, M., Pavec, M., Henry, M., Mazeas, F., Maury, J., Garreau, P., and Galgani, F. (2022). Characterization of floating microplastic contamination in the bay of Marseille (French Mediterranean Sea) and its impact on zooplankton and mussels. *Marine Pollution Bulletin*, 175:113353.
- Gómez, M., Villagrán, M., Martínez, C., and Belmonte, A. (2018). Characterizing the longshore sediment transport pattern on beaches in the Gulf of Arauco, Chile, to assess morphological shoreline evolution. *Journal of Coastal Research*, (85 (10085)):656–660.
- González-Saldía, R., Pino-Maureira, N., Muñoz, C., Soto, L., Durán, E., Barra, M., Gutiérrez, S., Díaz, V., and Saavedra, A. (2019). Fecal pollution source tracking and thalassogenic diseases: The temporal-spatial concordance between maximum concentrations of human mitochondrial DNA in seawater and Hepatitis A outbreaks among a coastal population. *Science of The Total Environment*, 686:158–170.
- Grantham, T. E., Figueroa, R., and Prat, N. (2013). Water management in mediterranean river basins: a comparison of management frameworks, physical impacts, and ecological responses. *Hydrobiologia*, 719(1):451–482.
- Grunnet, K. (1978). Selected microorganisms for coastal pollution. *Studies and Coastal Pollution Control*, 3:759–75.
- Habit, E., Belk, M. C., Cary Tuckfield, R., and Parra, O. (2006). Response of the fish community to human-induced changes in the Biobío River in Chile. *Freshwater Biology*, 51(1):1–11.
- Hernández-Miranda, E., Quiñones, R., Aedo, G., Valenzuela, A., Mermoud, N., Román, C., and Yañez, F. (2010). A major fish stranding caused by a natural

- hypoxic event in a shallow bay of the eastern South Pacific Ocean. *Journal of Fish Biology*, 76(7):1543–1564.
- Hidalgo, P. (2011). Informe final. Proyecto FIP N°2009-39; Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas en las VIII y IX regiones. 2009.
- Jones, C. E., Dagestad, K.-F., Breivik, Ø., Holt, B., Röhrs, J., Christensen, K. H., Espeseth, M., Brekke, C., and Skrunes, S. (2016). Measurement and modeling of oil slick transport. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(10):7759–7775.
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M., et al. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, 258(4):415–424.
- Lazure, P. and Dumas, F. (2008). An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, 31(2):233–250.
- 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. (2018). 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.
- Lemarié, F., Marchesiello, P., Debreu, L., and Blayo, E. (2014). *Sensitivity of ocean-atmosphere coupled models to the coupling method: example of tropical cyclone Erica*. PhD thesis, INRIA Grenoble; INRIA.
- Leth, O. and Middleton, J. F. (2004). A mechanism for enhanced upwelling off central Chile: Eddy advection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12).
- Leth, O. and Middleton, J. F. (2006). A numerical study of the upwelling circulation off central Chile: Effects of remote oceanic forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C12).
- Lett, C., Verley, P., Mullon, C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., and Blanke, B. (2008). A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 23(9):1210–1214.
- Little, C., Lara, A., McPhee, J., and Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*, 374(1-2):162–170.
- Madec, G., Bourdallé-Badie, R., Bouttier, P.-A., Bricaud, C., Bruciaferri, D., Calvert, D., Chanut, J., Clementi, E., Coward, A., Delrosso, D., et al. (2017). Nemo ocean engine. Fix broken cross-references, still revision 8625 from SVN repository.
- Mardones, P., Wong, Z., Contreras-Rojas, J., Muñoz, R., Hernández-Miranda, E.,

- and 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.
- Marsaleix, P., Auclair, F., Floor, J. W., Herrmann, M. J., Estournel, C., Pairaud, I., and Ulses, C. (2008). Energy conservation issues in sigma-coordinate free-surface ocean models. *Ocean Modelling*, 20(1):61–89.
- Mason, E., Molemaker, J., Shchepetkin, A. F., Colas, F., McWilliams, J. C., and Sangrà, P. (2010). Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Modelling*, 35(1-2):1–15.
- Mellor, G. L. (1998). *Users guide for a three dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University Princeton, NJ.
- Mooney, P., Mulligan, F. J., Bruyère, C., Parker, C. L., and Gill, D. (2019). Investigating the performance of coupled WRF-ROMS simulations of Hurricane Irene (2011) in a regional climate modeling framework. *Atmospheric Research*, 215:57–74.
- Orrego, R., Hewitt, L. M., McMaster, M., Chiang, G., Quiroz, M., Munkittrick, K., Gavilán, J. F., and Barra, R. (2019). Assessing wild fish exposure to ligands for sex steroid receptors from pulp and paper mill effluents in the Biobio River Basin, Central Chile. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171:256–263.
- Parada, C. E., Sobarzo, M. A., Figueroa, D., and Castro, L. (2001). Circulación del Golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Investigaciones marinas*, 29(1):11–23.
- Parra, O., Figueroa, R., Valdovinos, C., Habit, E., and Díaz, M. (2013). Programa de Monitoreo de la calidad del agua del Sistema río Biobío 1994–2012, Aplicación del anteproyecto de norma de la calidad del agua del río Biobío. *Universidad de Concepción, Concepción*.
- Parra, O., Valdovinos, C., Habit, E., and Figueroa, R. (2009). Long term study of the Biobío River: a complex multiuse fluvial system in Chile. In *Proceedings 7th International Symposium on Ecohydraulics, Concepción*, page 23.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8):929–937.
- Peredo Núñez, E. (2010). Contaminación del agua en la región del Maule y Biobío. *RIAT Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 6(1):61–68.
- Pizarro Arraigada, O. (2016). Ondas atrapadas: una autopista que une el océano Pacífico ecuatorial con las costas de Perú y Chile. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, 3(11):4–7.
- Pucci, G., Acuña, A., and Pucci, O. (2013). Contaminación microbiológica por

- enterobacterias y coliformes totales de la playa de Stela Maris, Comodoro Rivadavia, Argentina, derivada de los efluentes cloacales. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 13 (5), pages 1102–1107.
- Putri, M. R., Alghifari, N., Bernawis, L. I., Setiawan, A., and Mandang, I. (2022). Numerical assessment of flushing time in Balikpapan Bay. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2668, page 040002. AIP Publishing LLC.
- Rahn, D. A. and Garreaud, R. D. (2014). A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of South America. *International Journal of Climatology*, 34(3):780–792.
- Renault, L., Dewitte, B., Marchesiello, P., Illig, S., Echevin, V., Cambon, G., Ramos, M., Astudillo, O., Minnis, P., and Ayers, J. K. (2012). Upwelling response to atmospheric coastal jets off central Chile: A modeling study of the October 2000 event. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C2).
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4):347–404.
- SHOA (2014). Datos de Marea, Coronel. <http://www.shoa.cl>.
- Silva, N., Rojas, N., and Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16):1004–1020.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF version 2. Technical report, National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale . . . .
- Staalstrøm, A., Kristiansen, T., and Christie, H. C. (2017). Vurdering av spredning av partikler fra Aksla steinbrudd. *NIVA-rapport*.
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction to physical oceanography*. Robert H. Stewart.
- Talley, L. D. (2011). *Descriptive Physical Oceanography: an introduction*. Academic press.
- Tapia, F. (2010). Informe final. Proyecto FIP N°2008-20; Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas en las VIII y IX regiones. 2008.
- Ulloa, O. and Pantoja, S. (2009). The oxygen minimum zone of the eastern South Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16):987–991.
- Valdovinos, C. and Parra, O. (2006). La cuenca del río Biobío: historia natural de un ecosistema de uso múltiple. *Publicaciones Centro EULA*, pages 1–25.

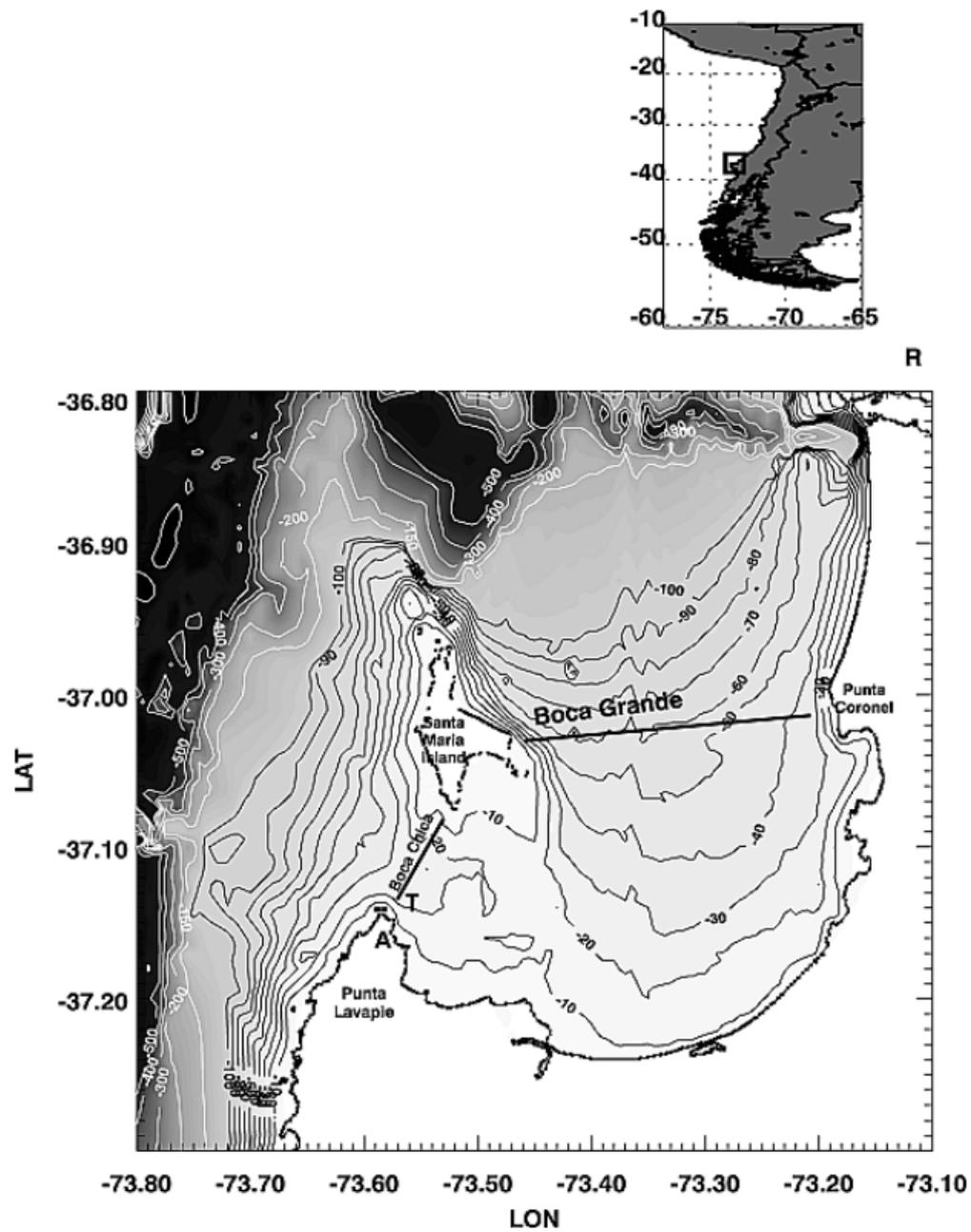
- Valle-Levinson, A., Atkinson, L. P., Figueroa, D., and Castro, L. (2003). Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C2).
- Vargas, C. A. and Castro, L. R. (2001). Spawning of the Chilean hake (*Merluccius gayi*) in the upwelling system off Talcahuano in relation to oceanographic features. *Scientia Marina*, 65(2):101–110.
- Vendrell, M. C., Gallardo, C., Torres, M., Mínguez, L. R., Nespereira, P. A., and López, L. A. R. (1999). Estudio de la supervivencia de distintos patógenos en agua termal y agua de río. *Boletín de la Sociedad Española de Hidrología Médica*, 14(2):71–81.
- Vergara, O. A., Echevin, V., Sobarzo, M., Sepúlveda, H., Castro, L., and Sotomendoza, S. (2023). 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.
- Villagrán, M., Gómez, M., and Martínez, C. (2022). Coastal Erosion and a Characterization of the Morphological Dynamics of Arauco Gulf Beaches under Dominant Wave Conditions. *Water*, 15(1):23.
- Wong, Z., Saldías, G. S., Largier, J. L., Strub, P. T., and Sobarzo, M. (2021). Surface thermal structure and variability of upwelling shadows in the Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(4):e2020JC016194.
- Wong Chang, Z. E. et al. (2022). Sombras de surgencia en el Golfo de Arauco: formación y evolución en respuesta al forzamiento en distintas escalas de variabilidad.
- Yannicelli, B., Castro, L. R., Valle-Levinson, A., Atkinson, L., and Figueroa, D. (2006). Vertical distribution of decapod larvae in the entrance of an equatorward facing bay of central Chile: implications for transport. *Journal of Plankton Research*, 28(1):19–37.
- Zhao, X. and Chan, J. C. (2017). Changes in tropical cyclone intensity with translation speed and mixed-layer depth: idealized WRF-ROMS coupled model simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(702):152–163.

## Apéndice A

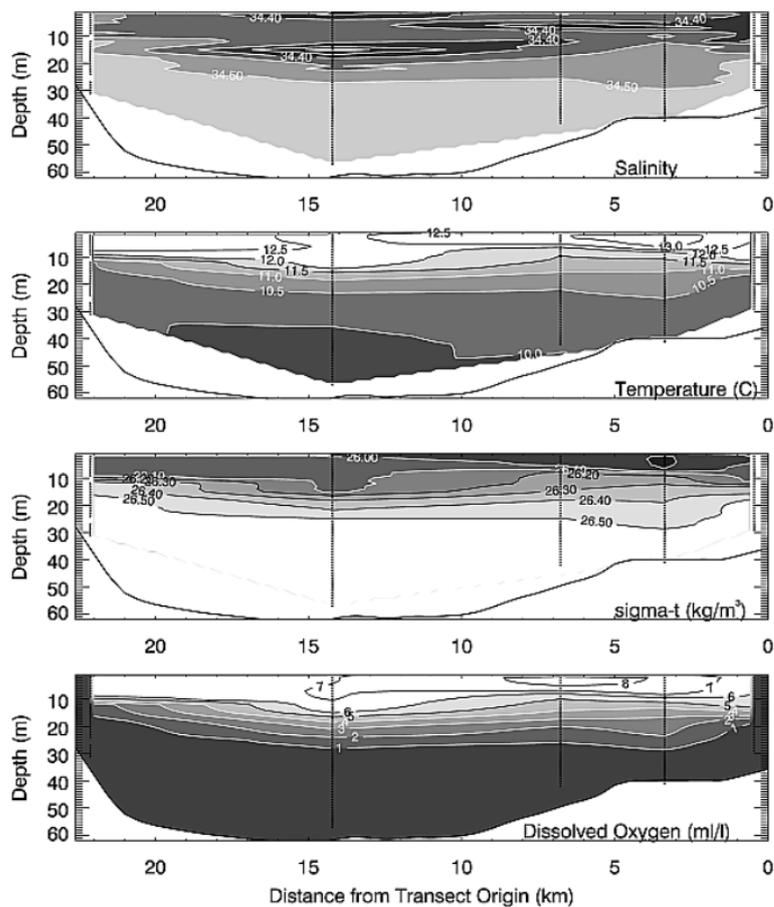
### Figuras secundarias

Las ubicaciones de las secciones verticales que se analizaron en los resultados fueron extraídas de acuerdo a lo mostrado en la figura 2 de [Valle-Levinson et al. \(2003\)](#) (fig. A0.1), en donde se compararon las variables de salinidad, temperatura y densidad sigma-t expuestas en la figura 4 (fig. A0.2) en Boca Grande. La comparación se llevó a cabo con una simplificación de esta gráfica, en donde se caracterizó la sección vertical separando por capas a distintas profundidades, en donde cada capa representaba un espacio a lo largo de la transecta con una profundidad de 10 metros, tomando desde la superficie hasta los 40 metros, de esta forma se hizo una comparación en 4 capas distintas (tabla 3.3.1).

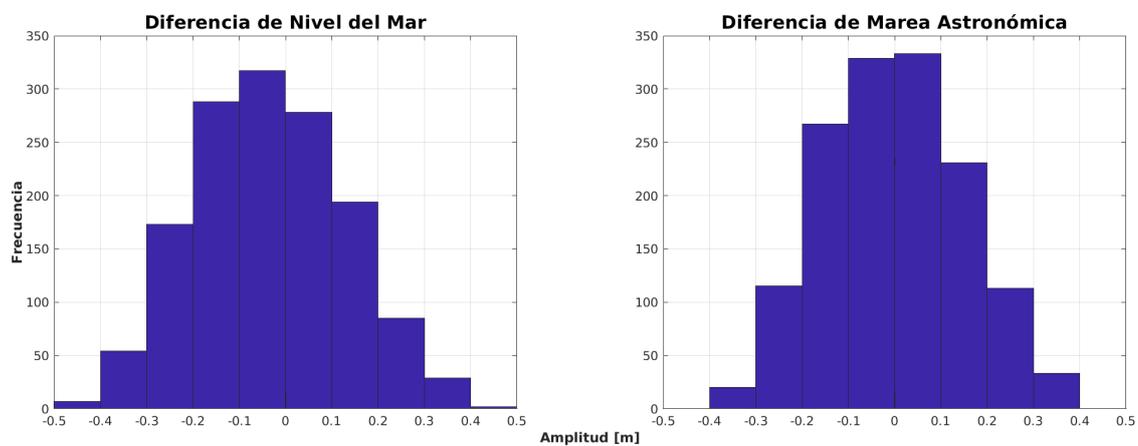
Al realizar las diferencias entre las series de tiempo de nivel del mar y marea astronómica de los datos del SHOA y las salidas del modelo, observamos un rango de diferencias que varía entre  $\pm 0.5$  metros, la distribución de estas diferencias (fig. A0.3) muestran que los valores se concentran entre  $\pm 0.2$  metros, tanto para el nivel del mar como para la marea astronómica.



**Figura A0.1:** Sección vertical en Boca Grande para la fecha del 6 de diciembre del año 2000 (Valle-Levinson et al., 2003). Muestra las variables de salinidad, temperatura, densidad y oxígeno disuelto.



**Figura A0.2:** Sección vertical en Boca Grande para la fecha del 6 de diciembre del año 2000 (Valle-Levinson et al., 2003). Muestra las variables de salinidad, temperatura, densidad y oxígeno disuelto.



**Figura A0.3:** Histograma de las diferencias de nivel del mar y marea astronómica entre las salidas del modelo y los datos SHOA.