

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



**Circulación del Golfo de Arauco y patrones de
dispersión y residencia de contaminantes
asociados a emisarios submarinos.**

Josselyn Contreras Rojas

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Septiembre, 2017

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

**Circulación del Golfo de Arauco y patrones de
dispersión y residencia de contaminantes
asociados a emisarios submarinos.**

Josselyn Contreras Rojas

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Profesor Guía:

Dra. Carolina Parada Véliz.

Comisión:

Dr. Dante Figueroa Martínez, Dr. Andrés Sepúlveda Allende



Septiembre, 2017

Índice general

1. Introducción	13
1.1. El problema de la contaminación marina	13
1.2. Modelación numérica de la dispersión de contaminantes	14
1.3. Antecedentes y problemáticas de la zona de estudio	16
1.4. Objetivos	18
1.5. Descripción del trabajo	18
2. Materiales y Métodos	20
2.1. Circulación de la zona de estudio	20
2.1.1. Configuración y salidas del modelo hidrodinámico	20
2.1.2. Transectas, sección horizontal y extracción de variables	22
2.1.3. Caracterización de datos de la circulación en el Golfo de Arauco	23
2.1.4. Cálculo de estabilidad	24
2.1.5. Cálculo de estratificación	25
2.1.6. Selección de períodos contrastantes	26
2.2. Simulación de emisión de contaminantes	26
2.2.1. Configuración del modelo de dispersión Lagrangiano	27
2.2.2. Cálculo del tiempo de residencia de las partículas liberadas en el sistema	28
2.2.3. Análisis de trayectorias de contaminantes: Trayectorias prefe- ridas versus zonas impactadas	29
3. Resultados	32
3.1. Ciclo anual del Golfo de Arauco	32
3.1.1. Corrientes al interior del Golfo de Arauco	33
3.1.2. Circulación en la Boca Chica	38

3.1.3. Circulación en la Boca Grande	40
3.1.4. Hidrografía del Golfo de Arauco	41
3.2. Variabilidad interanual del Golfo de Arauco	44
3.2.1. Períodos escogidos para la simulación de emisión de contami- nantes	50
3.3. Impacto en el Golfo de Arauco	55
3.3.1. Tiempos de circulación de las partículas al interior de Golfo de Arauco	55
3.3.2. Trayectorias y zonas de concentración dentro del Golfo de Arauco	56
3.3.3. Impacto en la costa	60
4. Discusión	64
4.1. Modelación de la circulación del Golfo de Arauco y simulaciones hi- drodinámicas	64
4.2. Modelo conceptual de corrientes al interior del Golfo de Arauco . . .	65
4.3. Modelo de dispersión lagrangiano	68
4.4. Impacto en la costa	70
5. Conclusión	72
Bibliografía	75

Índice de figuras

1.1. Mapa de la zona de estudio ubicada en el GA. La barra de colores indica la batimetría de la zona de estudio. Con estrellas se indican en el mapa 4 emisarios submarinos domésticos en operación. Se indican también el cañón del Bío Bío, la desembocadura del río Bío Bío (RBB) y la isla Santa María (ISM). En líneas punteadas se muestran las dos conexiones del GA con el océano (Bocas). A la izquierda se muestra la ubicación de la zona de estudio en Sudamérica.	17
2.1. Grilla del modelo hidrodinámico utilizado. En gris se puede observar la máscara utilizada para delimitar el borde continental.	22
2.2. Batimetría del modelo hidrodinámico utilizado. Las líneas punteadas en amarillo representan la sección 1 (S1), sección 2 (s2), sección 3 (s3). En azul se señalan los límites del sistema: Boca grande 1 (BG1), Boca grande 2 (BG2) y Boca Chica (BC)	23
2.3. Puntos seleccionados para estudiar la frecuencia de los fenómenos oceanográficos al interior del GA.	24
2.4. Grillado en el que se separó la zona de estudio para analizar la concentración de partículas.	30
2.5. Zonas en las que se estudia el impacto en la costa. Zona 1: Desembocadura RBB, Zona 2: San Pedro 1, Zona 3: San Pedro 2, Zona 4: San Pedro 3, Zona 5: Coronel Norte, Zona 6: Coronel Sur, Zona 7: Lota, Zona 8: Colcura, Zona 9: Laraquete, Zona 10: Arauco 1, Zona 11: Arauco 2, Zona 12: Arauco 3, Zona 13: Tubul, Zona 14: La Cal, Zona 15: Punta Lavapie, Zona 16: Isla Santa María SW, Zona 17: Isla Santa María SE, Zona 18: Isla Santa María NE, Zona 19: Isla Santa María NW	31

3.1. <i>Análisis de ondeleta de la variable salinidad para el punto 73° 24' W, 36°57'S. a) Poder espectral de salinidad y b) Espectro global de salinidad. Se nota un aporte a la varianza de la señal anual y decadal, aunque esta última no es confiable por encontrarse fuera del cono de significancia.</i>	32
3.2. <i>Promedio mensual de corrientes a los 5 metros de profundidad para a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril e) Mayo, f) Junio, g) Julio, h) Agosto, i) Septiembre, j) Octubre, k) Noviembre y l) Diciembre.</i>	34
3.3. <i>Promedio mensual de corrientes a los 50 metros de profundidad para a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril e) Mayo, f) Junio, g) Julio, h) Agosto, i) Septiembre, j) Octubre, k) Noviembre y l) Diciembre.</i>	35
3.4. <i>Estabilidad de las corrientes a los 5 metros para a)verano, b)otoño, c)invierno, d)primavera.</i>	37
3.5. <i>Estabilidad de las corrientes a los 50 metros para a)verano, b)otoño, c)invierno, d)primavera.</i>	38
3.6. <i>Componente u de la corriente a través de la sección BC para a) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera del año climatológico. Las corrientes positivas (rojo) indican entrada al GA, las negativas (azules) indican salida.</i>	39
3.7. <i>Componente v de la corriente a través de la sección BG1 para a) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera del año climatológico. Las corrientes negativas (azul) indican entrada al GA, las positivas (rojas) indican salida.</i>	40
3.8. <i>Promedio estacional de temperatura en la sección 2 para a)verano, b)otoño, c)invierno y d)primavera.</i>	42
3.9. <i>Promedio estacional de salinidad en la sección 2 para a)verano, b)otoño, c)invierno y d)primavera.</i>	43
3.10. <i>Promedios estacionales de la estratificación de columna de agua para a)verano, b)otoño, c)invierno y d) primavera (Baja $\phi < 50$, media $50 < \phi < 100$, alta $\phi > 100$).</i>	44
3.11. <i>Anomalías de la componente meridional (m/s) de la corriente a 5 m (paneles superiores) y 50 m (paneles inferiores) con respecto al año climatológico para sección 1 (a y d), sección 2 (b y e) y sección 3 (c y f). En contornos negros se muestran anomalías que superan los 0.1 m/s.</i>	46

3.12. a) Dirección y b) magnitud del forzante de viento en el punto $73^{\circ} 24'$ W, $36^{\circ} 57' 36''$ S. En el panel b se muestra el promedio mensual de la magnitud del viento utilizado como forzante en el modelo (negro) junto al ciclo anual de la misma (en rojo)	47
3.13. Anomalías superficiales (5 metros) de salinidad en las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.	48
3.14. Anomalías de salinidad para el fondo (50 metros) de las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.	48
3.15. Anomalías superficiales (5 metros) de temperatura en las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.	49
3.16. Anomalías de temperatura para el fondo (50 metros) de las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.	49
3.17. Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 1.	51
3.18. Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 2.	52
3.19. Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 3.	53
3.20. Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 4.	54
3.21. Promedio estacional de concentración de partículas entre la superficie y los 20 metros de profundidad. Cada fila representa una estación en el siguiente orden: otoño (a-d), invierno (e-h), primavera (i-l) y verano (m-p). Cada columna representa un período de estudio en el siguiente orden período 1, período 2, período 3, período 4.	58
3.22. Promedio estacional de concentración de partículas entre los 40 metros de profundidad y el fondo. Cada fila representa una estación en el siguiente orden: otoño (a-d), invierno (e-h), primavera (i-l) y verano (m-p). Cada columna representa un período de estudio en el siguiente orden período 1, período 2, período 3, período 4.	59
3.23. Promedio diario de llegada de partículas a cada una de las zonas estudiadas (eje y), para cada uno de las estaciones y períodos analizados (eje x; O:otoño, I:Invierno, P:Primavera, V:Verano. Referencia geográfica de las zonas en la figura 2.5)	61

- 3.24. Promedio estacional del impacto en la zona costera para a) verano, b)otoño, c)invierno, d)primavera. La barra de colores representa el número de partículas que llegan al día durante las estaciones estudiadas. 62
- 4.1. Esquema de circulación de corrientes estacionales a los 5 (a,c,e,g) y 50 (b,d,f,h) metros. Las sombras circulares bajo las corrientes indican circulaciones ciclónicas (rojo) y anticiclónicas (azul). La intensidad de las corrientes se separó entre alta (—), media (- - -) y baja (···). . . 66
- 4.2. Mapa de la zona de estudio ubicada en el Golfo de Arauco. Junto al uso ecosistémico que presentan las diferentes zonas. 71

Índice de tablas

2.1. Posición de las bocas de los 4 emisarios submarinos domésticos simulados en este estudio (Fig. 1.1)	28
3.1. Períodos determinados para las estaciones oceanográficas.	33
3.2. Porcentaje de nodos de corriente que mantienen la misma dirección que durante el año climatológico.	50
3.3. Fecha inicial y final de los períodos contrastantes que serán analizados.	50
3.4. Tiempos de circulación de partículas al interior del golfo de acuerdo a diferencias de densidad ($d1: 0.8 \text{ gr/cm}^3$, $d2: 1.725 \text{ gr/cm}^3$, $d3: 2.65 \text{ gr/cm}^3$), emisario por el cual son liberadas (E1: Coronel Norte, E2: Coronel Sur, E3: Lota, E4: San Pedro) y por período de estudio (P1: Período 1, P2: Período 2, P3: Período 3, P4: Período 4). Los valores corresponden a la separación entre el porcentaje de partículas que se retiro del sistema por las bocas (out) y las que colisionaron con la costa (bch).	55
3.5. Descomposición del tipo de partículas que llega a cada una de las zonas costeras (determinada en la figura 2.5), de acuerdo al emisario de origen (E1: Coronel Norte, E2: Coronel Sur, E3: Lota, E4: San Pedro) y de acuerdo a la densidad de las partículas ($d1: 0.8 \text{ gr/cm}^3$, $d2: 1.725 \text{ gr/cm}^3$, $d3: 2.65 \text{ gr/cm}^3$). Los valores se encuentran en porcentaje con respecto al total de partículas que llegan a cada zona.	63

“Even if you never have the chance to see or touch the ocean, the ocean touches you with every breath you take, every drop of water you drink, every bite you consume. Everyone, everywhere is inextricably connected to and utterly dependent upon the existence of the sea.”

- Sylvia Earle

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, pilares de mi existencia. Gracias por la paciencia y amor entregada a lo largo de mi vida y en particular durante el desarrollo de esta tesis. A mi madre por todos los tecitos a mitad de noche, los consejos y abrazos, tan necesarios cuando el estrés se hizo presente. A mi padre, por sus palabras de apoyo, tan confiado en que todo iba a salir bien. A mis tías Patricia y Cristina, mis segundas madres que han apoyado todos mis sueños y locuras desde siempre. Las que a pesar de no entender absolutamente nada de esta tesis (ni de mi carrera) siempre me escucharon con paciencia. Gracias por entregarme tanto amor.

Agradezco a mi profesora guía Carolina Parada, por el apoyo entregado durante todo este proceso. Gracias por enseñarme a cruzar mis límites, a salir de mi zona de confort y a creer en mí. Al profesor Dante Figueroa por la buena onda y las enseñanzas entregada durante todos los años de carrera. También quiero agradecer al profesor Andrés Sepúlveda y Osvaldo Artal por facilitar el modelo hidrodinámico, elemento base en la realización de esta tesis.

Quiero agradecer de manera especial a todos los amigos que me han acompañado a lo largo de este camino. A los que han estado a mi lado desde que esto solo era un sueño y a los que conocí durante todo mi proceso universitario. Un especial agradecimientos a todos aquellos que me apoyaron con mis estudios cuando las cosas se pusieron difíciles. Gracias a ustedes esto ha sido incluso mejor que en mis sueños.

A la comunidad universitaria, y en particular al Departamento de Geofísica. Estoy consciente y agradecida del enorme esfuerzo que hacen los profesores y personal del departamento para entregarnos, además de una excelente educación, un agradable lugar de trabajo.

Finalmente quiero agradecer a mi abuelita Rosalía. Sé que no estas conmigo físicamente pero sea donde sea que estés te digo: viejuja, cumplí.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo la determinación de la relación entre las variaciones tanto temporales como espaciales de las corrientes costeras en la zona del Golfo de Arauco (GA) con la dispersión de los contaminantes liberados por los emisarios domésticos dispuestos en la zona.

En la primera parte de este trabajo se caracterizó la circulación del GA a partir de 16 años de simulaciones 3D (1996-2011) realizadas con el modelo hidrodinámico ROMS (Regional Ocean Modelling System). Se estudió la variabilidad estacional y mensual de las corrientes a diferentes profundidades (5 y 50 metros), junto a la estabilidad que estas presentan a lo largo del período estudiado. A partir de estos resultados se propuso un esquema conceptual del ciclo anual de la circulación al interior del GA. Posteriormente se realizaron simulaciones de la emisión de contaminantes a partir de 4 puntos al interior del GA. Para esto se utilizó un modelo de dispersión lagrangiano acoplado a las simulaciones hidrodinámicas. Se seleccionaron 4 períodos de estudio que presentaron escenarios oceanográficos contrastantes para evaluar la importancia de dichas características sobre la dispersión o residencia de contaminantes en el GA. Para conocer las trayectorias de los elementos simulados y su variabilidad estacional e interanual se generaron mapas de concentración de contaminantes estacionales los cuales fueron relacionados con la circulación presente durante los períodos seleccionados. Junto a lo anterior, se analizó el impacto de los contaminantes en la zona costera y su variación estacional, determinando que las zonas más afectadas corresponden a las zonas de emisión y al borde NE de la Isla Santa María (ISM).

Capítulo 1

Introducción

1.1. El problema de la contaminación marina

Durante las últimas décadas, Chile ha sido objeto de un crecimiento en el desarrollo económico, donde las actividades industriales y domésticas del país han mostrado un crecimiento exponencial (CRUBC, 2012). Estas actividades, en su mayoría, tienden a aumentar la presión que se ejerce sobre las zonas costeras. De esta manera las costas del país han sufrido un importante impacto antropogénico, el cual genera un riesgo, no sólo a los ecosistemas y organismos que viven en estas zonas, sino que también a la salud de las personas. Las principales fuentes de contaminación marina en el país la constituyen tres grupos: los residuos industriales líquidos, los puertos y terminales pesqueros y los emisarios submarinos. Los residuos industriales líquidos (RILES) pueden ser vertidos directamente a los ríos o al mar, previo tratamiento para evitar o disminuir su potencial contaminante. En segundo lugar, en puertos y terminales pesqueros se requiere de servicios de carga/descarga de suministros y combustible, traslado de personal y reparaciones, que sumado a eventos de derrames crónicos de hidrocarburos e ingreso de residuos hacen de las zonas portuarias sistemas fuertemente alterados, con una alta presión ambiental y una paulatina alteración de la calidad de las aguas y sedimentos (Ahumada, 1995; Casado-Martinez et al., 2007; McCready et al., 2004; Rudolph et al., 2002a; Sprovieri et al., 2007). Finalmente, los emisarios submarinos, permiten eliminar aguas servidas de centros urbanos hacia el mar (Carifeño, 2011). Estos emisarios transportan compuestos que son el resultado de las descargas domiciliarias y de los desechos industriales que eliminan sus residuos al alcantarillado (aluminio, arsénico, cadmio, cianuro, cobre,

coliformes fecales, cromo, estaño, fluoruro, hidrocarburos, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, sulfuros, zinc, entre otros). Si bien es cierto que descargar las aguas servidas en el mar desde el punto de vista sanitario puede ser una solución aparente para evitar las enfermedades en la población humana, no lo es desde el punto de vista de la salud del ambiente marino, en especial en aquellos sectores que recibirán la gran cantidad de elementos nocivos que -se supone- serán diluidos en la columna de agua. Además los contaminantes pueden tener efectos e impactos inesperados, dependiendo de la concentración y de la combinación de los mismos. Estos impactos pueden ir desde efectos tóxicos directos, trastorno del sistema inmune y reproductor de organismos, hasta efectos directos sobre especies específicas, poblaciones y comunidades, deterioro del hábitat, entre otros (Aguirre-Martínez et al., 2009; Ahumada et al., 2004; Arcos et al., 1987; Leonardi y Tarifeño, 1996; Pozo et al., 2014; Rudolph et al., 2002b).

1.2. Modelación numérica de la dispersión de contaminantes

Una forma de disminuir el impacto de los residuos en el océano es por medio del estudio de la interacción de las emisiones con las características oceánicas de la zona de vertido previo a la instalación de los emisarios. De esta forma se puede determinar qué zonas presentan mayor residencia de contaminantes y escoger un área de vertido que impacte de menor forma posible el ambiente acuático. Esto puede obtenerse por medio del uso de modelos numéricos que permitan estudiar e identificar los patrones de dispersión y residencia de contaminantes (Liubartseva et al., 2016; Perianez, 2011; Zelenke et al., 2012). Actualmente existe una gran diversidad de modelos numéricos que han sido usados para evaluar la calidad de las aguas (Blumberg y Mellor, 1987; Chen, 1978; Ilyina et al., 2006; Mellor, 1998; Park et al., 2008; Periañez, 2012; Shchepetkin y McWilliams, 2005; Wang et al., 1975). La mayoría de estos modelos consideran los campos de flujo de corrientes que conducen el movimiento de los constituyentes del agua que se modelan y la transformación de los diferentes constituyentes de la calidad del agua. Sin embargo, existe una amplia variedad de modelos y configuraciones de modelos específicos para diferentes trazadores. Algunas de las diferencias que estos modelos presentan son: el ambiente de estudio (estuarios, ríos, zonas costeras), el nivel de complejidad, si es un software libre o privado, la variabili-

dad temporal (estacionarios o con variación en el tiempo), la resolución espacial (una, dos o tres dimensiones), los procesos que involucran (flujos o transporte), el enfoque ambiental (químico, biológico, físico) y apoyo técnico disponible para la comprensión del modelo (manuales de usuarios, documentación, entrenamiento) (Bahadur et al., 2013).

De la misma forma los contaminantes presentan una gran variedad de comportamientos, lo que implica el desarrollo de algoritmos particulares para caracterizar cada uno de ellos. Por ejemplo, los contaminantes pueden tener una fuente puntual (como los emisarios o derrames) o una fuente difusa (como la deposición atmosférica), pueden estar disueltos en el agua, unidos a partículas, ser partículas, flotar o formar parte de los sedimentos. Algunos contaminantes pueden encontrarse en diferentes fases (por ejemplo los metales pueden estar en una solución o como partículas). Algunos sufren reacciones químicas durante la dispersión en el océano (la radioactividad decae con el tiempo, el petróleo puede comportarse de diferentes formas dependiendo del tipo presente en el derrame).

Finalmente se debe considerar el enfoque del modelo para conocer la trayectoria que seguirán los contaminantes en el ambiente. Esto se puede lograr por medio de una ecuación que mide la concentración de dicho contaminante durante la simulación (método euleriano) o un método que siga la posición de partículas para cada paso de tiempo (método lagrangiano). Los métodos eulerianos son más adecuados para aquellas sustancias que se dispersan ampliamente, pero se debe tener especial cuidado con la advección, ya que en casos de gradientes pronunciados pueden causar una difusión excesiva. Esto no es un problema con el método lagrangiano, el cual es ideal para los casos de fuentes puntuales. Sin embargo, este último presenta desventajas cuando la sustancia ha sido altamente dispersada, ya que se necesita un gran número de partículas para representar la concentración de forma precisa (James, 2002).

Debido al alto costo computacional que significa integrar cada particularidad de los contaminantes, no es posible evaluar cada tipo de contaminante presente en las aguas vertidas al océano. Por lo tanto se hace necesario realizar aproximaciones que permitan simplificar las características de los contaminantes de acuerdo a las necesidades de cada estudio.

1.3. Antecedentes y problemáticas de la zona de estudio

Un ejemplo de contaminación en las costas de Chile es el caso del Golfo de Arauco (GA) (entre $36^{\circ} 45'$ y $37^{\circ} 20'S$). Este golfo es un importante centro de desove y reclutamiento de especies de peces (Landaeta y Castro, 2006). Además, es una de las zonas costeras más productivas a nivel mundial (Hernández et al., 2011). El GA tiene como límite sur a Punta Lavapié (PL), en la comuna de Arauco y como límite norte a la desembocadura del río Bío Bío (RBB). En su extremo occidental se encuentra ubicada la isla Santa María (ISM), que genera dos entradas de agua, la Boca Grande al norte y la Boca Chica al oeste (Fig 1.1). Al ser un área de alta riqueza hidrobiológica se concentran importantes caletas e infraestructura asociada a dicha actividad. Por esta razón es que se ha convertido en un polo de actividad urbana e industrial. Debido a este aumento en la actividad antropogénica, esta zona recibe un flujo constante de residuos que provienen de los diversos emisarios industriales y domésticos situados en la costa (Fig. 1.1). Como resultado de la intensa actividad industrial en la zona, las condiciones ambientales han decaído exponencialmente afectando a las localidades del GA. Durante los años 2004 y 2005 se reportaron emergencias por fuga de trementina en el mar, lo que generó una mortandad de peces y mariscos en la zona. Esto presenta un problema social ya que pone en riesgo tanto la salud como la fuente de trabajo de las personas que habitan esta región.

Puesto que el destino final de los residuos es el océano, las condiciones oceanográficas y la geografía de la zona de vertido son importantes en la dispersión de los contaminantes. Lamentablemente el conocimiento de las dinámicas costeras estacionales o interanuales en el GA es escaso y los modelos hidrodinámicos que simulan el movimiento de las masas de agua no son de la resolución espacial necesaria para realizar análisis detallados al nivel de golfos y bahías. Existen algunos trabajos que describen patrones de circulación del GA durante períodos de mayor o menor extensión, sin embargo, la mayoría de estos se enfoca en los períodos de surgencia (Djurfeldt, 1989; Letelier et al., 2009; Parada et al., 2001; Sobarzo et al., 2001; Valle-Levinson et al., 2003). Estudios durante el invierno austral son incluso más escasos y se enfocan en la hidrografía de las bahías al interior del GA (Faundez-Baez et al., 2001; Sobarzo et al., 2001). Existen otros estudios que utilizan simulaciones para describir la variabilidad estacional de las corrientes de esta zona, pero están enfocados en circulación de gran escala, ignorando elementos claves en la circulación de menor escala como

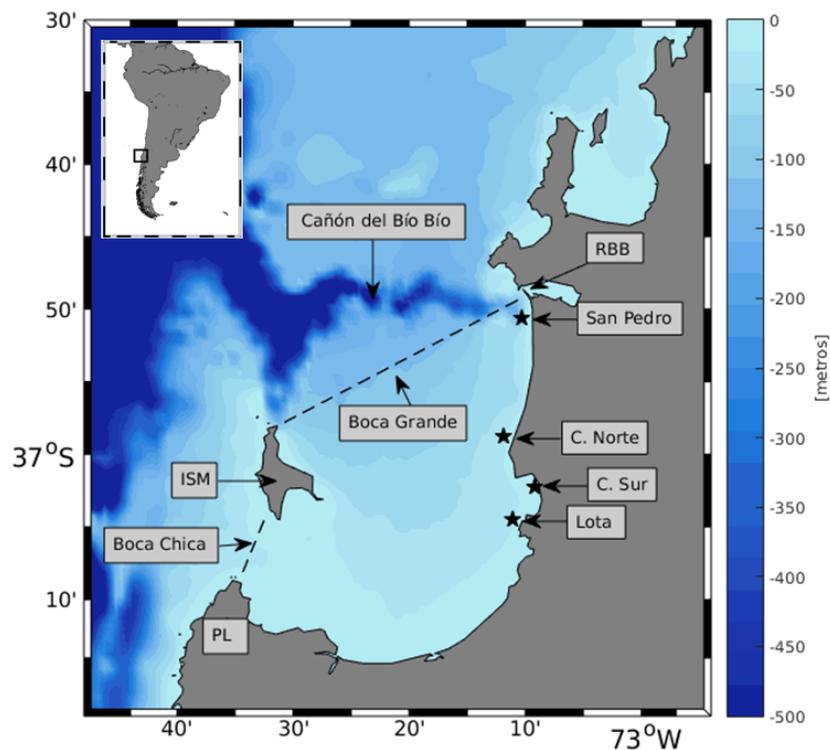


Figura 1.1: Mapa de la zona de estudio ubicada en el GA. La barra de colores indica la batimetría de la zona de estudio. Con estrellas se indican en el mapa 4 emisarios submarinos domésticos en operación. Se indican también el cañón del Bío Bío, la desembocadura del río Bío Bío (RBB) y la isla Santa María (ISM). En líneas punteadas se muestran las dos conexiones del GA con el océano (Bocas). A la izquierda se muestra la ubicación de la zona de estudio en Sudamérica.

la ISM, por lo que no representan las corrientes al interior del GA (Leth y Shaffer 2001; Mesias et al. 2001; Mesias et al. 2003).

Otra desventaja clave para el estudio del destino de los contaminantes en las aguas costeras es la falta de fiscalizaciones constantes y periódicas a los emisarios tanto industriales como domésticos. Esto se traduce en un registro intermitente de las concentraciones de contaminantes en las zonas costeras, lo que dificulta la determinación de la calidad de las aguas y de los patrones de dispersión de los residuos liberados.

Este estudio pretende ser un aporte hacia un mayor nivel de entendimiento, tanto de la dinámica de circulación del GA, como de los patrones de dispersión y residencia de los contaminantes que son liberados en esta zona, a partir de la modelación hidrodinámica y del seguimiento lagrangiano.

1.4. Objetivos

El objetivo general de este trabajo consiste en determinar la relación entre las variaciones tanto temporales como espaciales de las corrientes costeras en la zona del GA con la dispersión de los contaminantes liberados por los emisarios domésticos dispuestos en la zona.

Para llevar a cabo este objetivo, se realizó una serie de actividades que incluyen la revisión de estudios previos en la zona, análisis de simulaciones hidrodinámicas para comprender los procesos de circulación en el GA y la simulación y seguimiento de partículas. Por lo tanto los objetivos específicos de este trabajo son:

- Caracterizar la estacionalidad de la circulación en el GA e identificar los factores que generan este tipo de dinámica costera a partir de estudios realizados previamente en la zona y de simulaciones hidrodinámicas.
- Seleccionar escenarios de circulación contrastantes (anomalías de corrientes) para evaluar su influencia sobre la trayectoria de los contaminantes.
- Utilizar un modelo numérico para evaluar la relación entre la dispersión de los contaminantes y las variables oceanográficas.
- Determinar los patrones de dispersión y residencia de los contaminantes bajo diferentes escenarios de emisión.
- Estudiar las zonas de influencia de las emisiones de contaminantes y su impacto en el borde costero.

1.5. Descripción del trabajo

Esta habilitación profesional consta de 5 capítulos, estableciendo en la parte introductoria (capítulo 1) algunos de los aspectos importantes sobre la problemática actual de la contaminación en las aguas marinas, la importancia de la modelación como herramienta de mitigación e información de la zona de estudio para contextualizar el problema a desarrollar. Plantea además los objetivos generales y específicos del estudio. Posteriormente (capítulo 2) se describen las herramientas, modelos y metodologías utilizadas para llevar a cabo los diferentes análisis de la investigación. En el capítulo 3 se presentan los resultados de la caracterización de la circulación en

la zona de estudio y la selección de períodos estudiados. En la segunda parte de este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones de emisión de contaminantes, junto a los mapas de dispersión e impactos en la costa. En el capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos previamente. Se contrastan algunos de los resultados a la luz de la literatura disponible y se plantean los desafíos futuros. Se plantea además, un modelo conceptual de la circulación estacional del GA. Finalmente en el capítulo 5, se describen las conclusiones obtenidas de este trabajo.

Capítulo 2

Materiales y Métodos

La metodología fue dividida en dos grandes etapas. La primera consistió en el estudio de los patrones de circulación general presentes en las simulaciones obtenidas con un modelo hidrodinámico. A partir de este análisis se seleccionaron períodos con escenarios oceanográficos contrastantes. En la segunda parte se evaluaron los patrones de dispersión de contaminantes por medio del uso de un modelo de dispersión lagrangiano acoplado a las salidas de un modelo hidrodinámico estudiadas en la primera etapa.

2.1. Circulación de la zona de estudio

2.1.1. Configuración y salidas del modelo hidrodinámico

Para el análisis del comportamiento de las corrientes en el GA se utilizaron simulaciones existentes del modelo hidrodinámico ROMS (Regional Ocean Modelling System; Shchepetkin y McWilliams, 2005) versión AGRIF (Adaptive Grid Refinement in Fortran; Debreu et al., 2008). Este modelo resuelve las ecuaciones de movimiento primitivas del océano, hidrostática y de superficie libre. Incluye, además, esquemas de advección y mezcla vertical, en particular un modelo basado en la frecuencia de Brunt-Vaisala (BVF) y el modelo LMD (Large et al., 1994), algoritmos de gradiente de presión, capas de borde atmosféricas, oceánicas y de fondo oceánico, condiciones de borde radiativas (Marchesiello et al., 2001), potencialidad para la construcción de grillas con subdominios anidados (soluciones de mayor resolución para áreas como

la costera) entre otros. La configuración de este modelo fue generada en el marco del estudio: “Estimación de índices de reclutamiento basados en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile: Fase I” (Parada et al., 2013).

Los forzantes del modelo fueron tomados desde re-análisis NCEP/NCAR con una frecuencia de 6 horas y con condiciones de borde que se basan en ECCO, el cual combina un modelo general de circulación (GCM) y observaciones. La batimetría fue obtenida de una combinación entre la base de datos ETOPO2 y sondeos realizados por el Servicio Hidrológico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). ETOPO2 tiene una resolución espacial horizontal de 2 minutos de arco y es derivada de sondeos y observaciones gravitacionales satelitales. Además estas simulaciones incluyen la descarga mensual promedio de los ríos: Bío Bío, Bueno, Cautín, Itata, Mataquito, Maule, Maullín y Valdivia. Esta información fue obtenida de la Dirección General de Aguas de Chile (DGA). Las brechas existentes en las series de tiempo fueron rellenadas usando interpolación lineal y extrapolando con polinomios en los casos necesarios. Las simulaciones utilizadas en este estudio poseen 32 coordenadas verticales sigma que siguen la topografía de la región de estudio y 296x197 coordenadas curvilíneas horizontales, las cuales comprenden un área desde la costa hasta los 74°W entre las latitudes 34.5°S y 37.5°S. Estas simulaciones comprenden el período entre los años 1996 y 2011 con una frecuencia de 6 horas, lo que puede inducir un cierto nivel de *aliasing* (solapamiento) a algunas series de tiempo. Existen tres meses que presentaron problemas al ser guardados (Agosto/2002, Septiembre/2004 y Junio/2005), por lo que no fueron considerados en el estudio.

Las variables que entrega el modelo son: las componentes de velocidad (u, v, w), la temperatura, la salinidad y la elevación del nivel del mar. A partir de estas variables se llevan a cabo los experimentos para determinar los patrones de circulación en el GA.

Dado que esta simulación representa una gran densidad de datos, se hace necesaria una selección y reducción de los mismos. Para esto, se definieron límites tanto temporales como espaciales de la zona de estudio. Se realizaron promedios diarios y mensuales de cada variable para determinar un límite superior en la frecuencia de los fenómenos analizados. Esto también sirvió para disminuir el *aliasing* inducido por el período del muestreo (6 horas) de la simulación. A partir de los promedios mensuales se obtuvo un año climatológico con el cual se estudia el comportamiento esperado de las corrientes. Junto con lo anterior, y dado que este trabajo se enfoca

en el GA, solo se tomaron en consideración los puntos que se ubican en esta zona. La grilla seleccionada corresponde a 100 nodos entre los $72^{\circ}49'W$ y los $74^{\circ}16'W$ y 85 nodos distribuidos entre los $37^{\circ}25'S$ y los $37^{\circ}27'S$. Para los datos de la columna de agua se conservaron los 32 niveles verticales, obteniendo así un total de 272000 nodos.

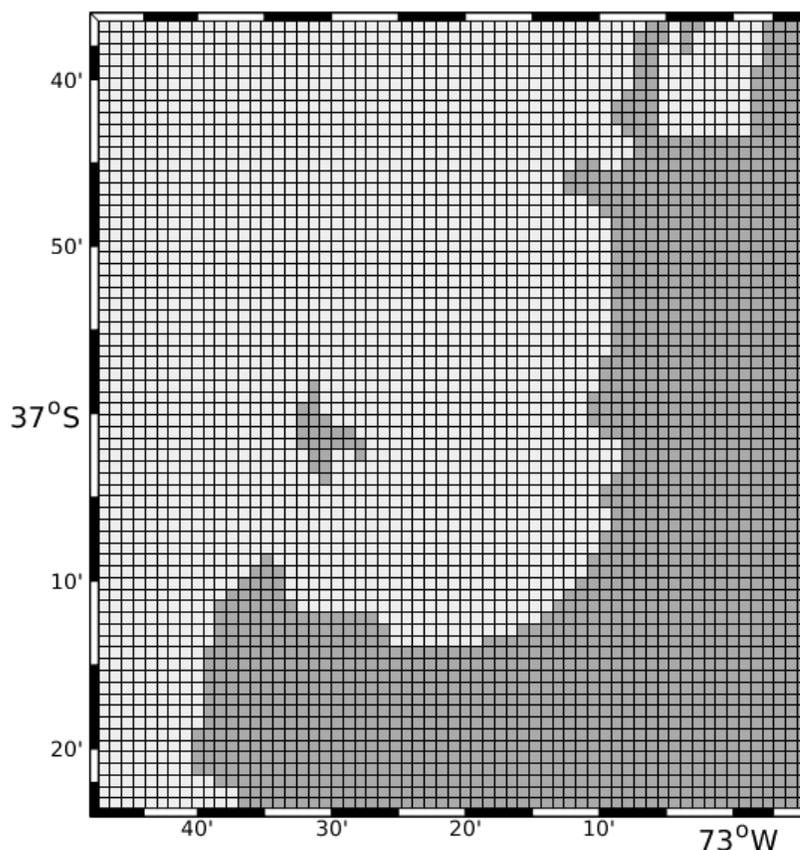


Figura 2.1: Grilla del modelo hidrodinámico utilizado. En gris se puede observar la máscara utilizada para delimitar el borde continental.

2.1.2. Transectas, sección horizontal y extracción de variables

A partir del dominio del modelo hidrodinámico se trazaron 3 transectas que marcan las fronteras del sistema. Estas son consideradas como las conexiones del GA con el océano que lo rodea. Las transectas seleccionadas se observan en la figura 2.2. La transecta zonal (BG1) se ubica sobre el cañón del Bío Bío. Las transectas meridionales se encuentran ubicadas a lo largo de $73^{\circ}30' W$ para delimitar el borde oeste

del GA. La primera se ubica sobre la boca chica (BC) del sistema entre las latitudes $37^{\circ}12'$ y $37^{\circ}4'S$ y la otra se encuentra al norte de la ISM hasta los $36^{\circ}48'S$ (BG2).

Finalmente, y para caracterizar el cambio de la circulación en la dirección vertical, se extrajeron cortes horizontales de velocidad a 5, 25, 50 y 65 metros de profundidad. Junto con esto, se obtuvieron cortes verticales de 3 secciones latitudinales al interior del sistema (Fig. 2.2). A partir de estos cortes, se generaron imágenes de las corrientes perpendiculares, salinidad y temperatura del GA (Fernández et al., 2005). Toda esta información en conjunto permitió caracterizar la circulación promedio del GA.

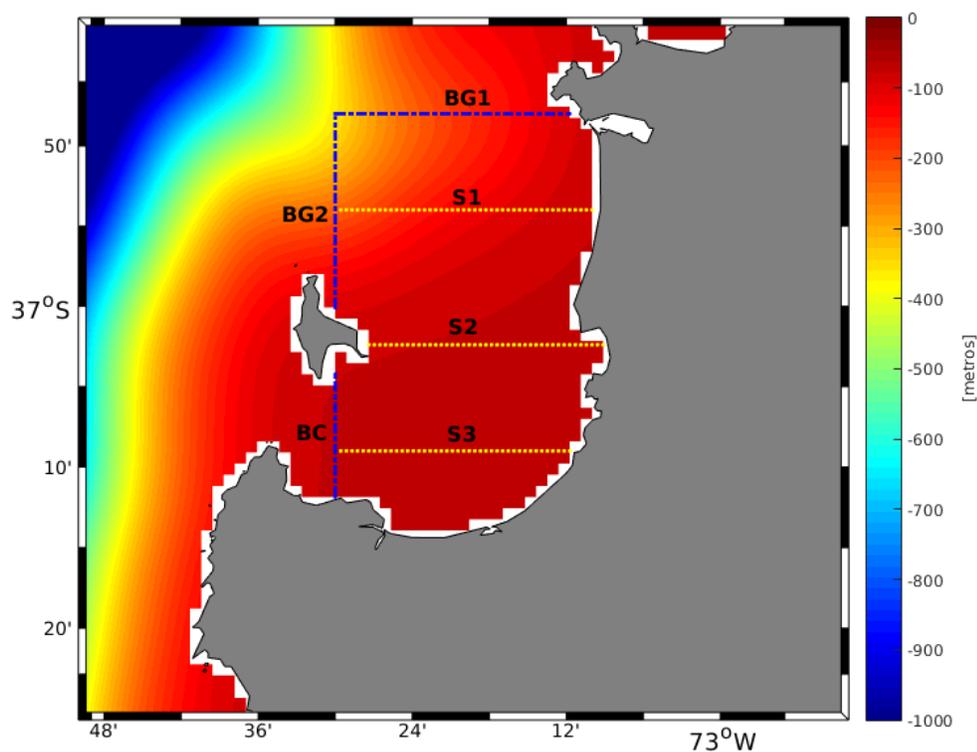


Figura 2.2: Batimetría del modelo hidrodinámico utilizado. Las líneas punteadas en amarillo representan la sección 1 (S1), sección 2 (s2), sección 3 (s3). En azul se señalan los límites del sistema: Boca grande 1 (BG1), Boca grande 2 (BG2) y Boca Chica (BC)

2.1.3. Caracterización de datos de la circulación en el Golfo de Arauco

Para determinar la estacionalidad de los fenómenos oceanográficos dentro del GA, se realizó un análisis de ondeletas según la metodología propuesta por Torrence y Compo (1998). Este análisis identifica las variaciones de potencia de series de tiempo por medio de la descomposición de una serie de tiempo en el dominio de las

frecuencias. A partir de esto determina los modos de variabilidad y cómo estos modos varían en el tiempo. Esta metodología introduce, además, un test de significancia, lo que permite descartar máximos de energía no significativos, entregando así una mayor confianza en los resultados.

Este análisis se efectuó sobre series de tiempo de las variables salinidad, temperatura y corrientes, presentes en el modelo hidrodinámico y a diferentes profundidades (5, 25 y 50 metros), obtenidas de localidades al interior de la zona de estudio (Fig. 2.3). Estas series, con un paso de tiempo de 6 horas, fueron filtradas utilizando promedios diarios, semanales y mensuales, suavizando así la serie y eliminando parte del ruido y *aliasing* presente en el modelo.

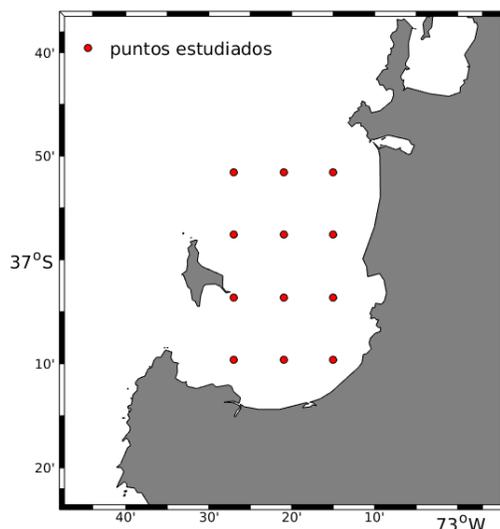


Figura 2.3: Puntos seleccionados para estudiar la frecuencia de los fenómenos oceanográficos al interior del GA.

2.1.4. Cálculo de estabilidad

Para analizar la variabilidad de los campos de corrientes se utilizó el índice de estabilidad obtenido a partir de Golbeck et al. (2015). Este índice, que se obtuvo a partir de cortes 2D de corrientes, identifica las áreas donde la magnitud y la dirección de las corrientes es constante a lo largo del tiempo, asignándole un valor entre 0 y 100 % a cada nodo de la grilla horizontal seleccionada (Fig. 2.1). Este índice que representa la estabilidad de las corrientes, se interpreta como altamente variable cuando es un valor bajo, mientras que un valor alto representa constancia de las corrientes.

El índice de estabilidad (PM) se calcula a partir de la tasa entre la corriente media

(\overline{VM}) y la magnitud de la corriente (\overline{PM}) , como se indica a continuación.

$$PM = \frac{\overline{VM}}{\overline{PM}} * 100 \quad (2.1)$$

donde $\overline{VM} = \sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2}}$ donde $\overline{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$; $\overline{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$

y $\overline{PM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i$ donde $M_i = \sqrt{u^2 + v^2}$

Los valores de u_i y v_i corresponden a la componente zonal y meridional de la corriente en cada uno de los nodos pertenecientes a la sección horizontal estudiada. En cambio \overline{u} y \overline{v} corresponden a la componente zonal y meridional del campo de corrientes en su totalidad.

En este estudio, el índice de estabilidad se utilizó tanto para determinar la estabilidad de las corrientes entre los promedios mensuales para los diferentes años, como para conocer la estabilidad de las corrientes diarias durante los períodos seleccionados en que se realiza el seguimiento de los eventos de contaminación (ver sección 2.1.6).

2.1.5. Cálculo de estratificación

Para identificar la estratificación de la columna de agua al interior del GA se utilizó el parámetro de estratificación (Simpson y Hunter, 1974). Este parámetro se define como:

$$\phi = \left(\frac{1}{k}\right) \sum_k^0 (\rho - \bar{\rho})gz\Delta z \quad (2.2)$$

donde ϕ es la cantidad de energía mecánica requerida para llevar a cabo la mezcla vertical (Jm^{-3} ; cero para una capa bien mezclada y aumenta con la estratificación), z es la coordenada vertical (positiva hacia arriba), k es la profundidad de integración en la columna de agua ($k = -60$ m), ρ es la densidad del agua, $\bar{\rho}$ es la densidad

media para el intervalo 0 a -60 m, g es la aceleración de la gravedad, y $\Delta z = 1$ m (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2008).

2.1.6. Selección de períodos contrastantes

El estudio de patrones de circulación de contaminantes al interior del GA se realizó en base a la selección de 4 períodos de estudio con características oceanográficas contrastantes. Estos períodos comprenden un intervalo de 12 meses para poder analizar y comparar el ciclo anual (ciclo más energético) entre ellos. El criterio de selección se basó en la obtención y análisis de diagramas de Hovmöller. Estos diagramas muestran la evolución temporal de una variable a lo largo de una sección latitudinal o longitudinal. Se analizó las anomalías de temperatura, salinidad y corriente perpendicular a la sección en los cortes latitudinales estudiadas al interior de GA y para las bocas (BC y BG1) (Fig.2.2). Estas secciones fueron analizadas a los 5 y 50 metros de profundidad. Aquellos meses que presentan problemas no fueron interpolados ni reemplazados con el mes climatológico debido a que podría inducirse una desviación del comportamiento real. A partir de las imágenes resultantes se seleccionaron aquellos años en los que existen períodos con características anómalas en la zona de estudio. Estas anomalías corresponden a cambios tanto en la intensidad como en la dirección esperada de las corrientes. Para asegurarse de que el cambio en las corrientes esté presente en gran parte de la zona de estudio, éste debe presentarse en más de uno de los diagramas estudiados.

2.2. Simulación de emisión de contaminantes

Se realizaron simulaciones de emisión de contaminantes para estudiar los patrones de contaminación del GA. Las emisiones consistieron en la liberación de partículas en sitios donde actualmente existen emisarios domésticos dispuestos en la costa (Fig. 1.1). Estas simulaciones se realizaron por medio del modelo de dispersión lagrangiano (MDL) Ichthyop (Lett et al., 2008). Este modelo, desarrollado en JAVA y de acceso libre, permite seguir la trayectoria de partículas gracias a su acoplamiento con un modelo hidrodinámico. Para este estudio, se utilizaron las simulaciones obtenidas de ROMS analizadas previamente. El MDL fue originalmente diseñado para el estudio del impacto de factores físicos y biológicos sobre la dinámica de huevos

y larvas. Sin embargo, debido a la flexibilidad que presenta para parametrizar las propiedades intrínsecas de las partículas emitidas (tasas de sedimentación, densidad, difusión horizontal, entre otros) ha sido ampliamente utilizado bajo otros escenarios (Andrello et al., 2013; Brochier et al., 2008; Lohmann et al., 2012; Ospina-Álvarez et al., 2012; Putman y He, 2013). Sumado a lo anterior, el modelo permite modificar la posición de las fuentes, frecuencia, cantidad y fechas de las emisiones, junto con el comportamiento de éstas al entrar en contacto con la costa. Como resultado el modelo entrega archivos NetCDF que poseen las coordenadas en 3 dimensiones de cada una de las partículas liberadas dentro de la simulación para cada uno de los tiempo simulados. Entrega también información del estado y de las características oceanográficas a las que estuvo expuesta cada una de las partículas.

No se incluyeron interacciones de tipo biogeoquímica entre las partículas y el medio. Verticalmente se incorporaron 3 densidades para caracterizar residuos suspendidos de diferentes densidades, mientras que horizontalmente los mecanismos incluidos corresponden a advección y difusión horizontal de la partícula.

2.2.1. Configuración del modelo de dispersión Lagrangiano

Considerando la escasa información disponible de la calidad de las emisiones realizadas por los emisarios submarinos, se determinó un valor de 1000 partículas para cada emisión realizada en las simulaciones. De esta forma se elimina la variabilidad inducida por el caudal liberado, centrándonos en el impacto de la variabilidad estacional del océano sobre las emisiones. Estas liberaciones de partículas fueron realizadas en las localidades donde actualmente se encuentran las salidas de los emisarios submarinos (Fig. 1.1). Esta ubicación geográfica, se obtuvo de las declaraciones de impacto ambiental de dichos emisarios y aparecen detallados en la tabla 2.1.

La liberación de partículas se realizó de forma periódica cada 10 días a partir de dos meses previos al inicio de cada período de estudio y se prolongó hasta un mes después del período de estudio. Estos 2 meses fueron utilizados como período transiente de la concentración de partículas, de forma que al inicio del período estudiado no exista una subestimación de partículas circulando al interior del GA. El paso de tiempo utilizado para la realización de esta simulación fue de 20 minutos, y las salidas se guardaron a las 12.00 de cada día, obteniendo así un dato diario para las trayectorias de las partículas liberadas. El comportamiento de las partículas al interactuar con la costa seleccionado, conlleva la detención total de la trayectoria de la partícula en

el momento en que ésta impacte la línea de costa del modelo. Este comportamiento se llama *beaching*. En algunos casos se utiliza una reinsertión de contaminantes al sistema oceánico (Liubartseva et al., 2016), pero dado que en este trabajo no se caracterizó ningún contaminante en particular, se determinó que este mecanismo era el más adecuado.

Tabla 2.1: Posición de las bocas de los 4 emisarios submarinos domésticos simulados en este estudio (Fig. 1.1)

Emisarios	Latitud	Longitud	Profundidad
Coronel Norte (E1)	36° 58'45.84 " S	73° 11'55.32" W	37 metros
Coronel Sur (E2)	37° 2'12.84" S	73° 9'10.8" W	37 metros
Lota (E3)	37° 4'29.28" S	73° 11'2.04" W	24.5 metros
San Pedro (E4)	36° 50'37.32 " S	73° 10'18.84" W	28 metros

Finalmente, y con la intención de representar diferentes densidades de sólidos suspendidos, se liberaron 3 grupos de elementos lagrangianos con una densidad diferente obteniendo un total de 12000 partículas liberadas cada 10 días. Las densidades escogidas fueron 0.8, 1.725 y 2.65 gr/cm^3 . Estas densidades corresponden a los valores límites y medio de la densidad de sólidos suspendidos típicos liberados por medio de emisarios domésticos (Russell, 2006).

2.2.2. Cálculo del tiempo de residencia de las partículas liberadas en el sistema

El tiempo de residencia se define como el período promedio en que las partículas circulan al interior del GA. Este es una característica muy importante del sistema desde el punto de vista de la contaminación. Depende principalmente de la batimetría y de la dinámica al interior del sistema, por lo que es un buen estimador de cuán rápido éste se depura. Este valor se estimó como el tiempo promedio que tardan las partículas en abandonar el sistema. Se considera que las partículas abandonan el sistema al cruzar los límites establecidos en las bocas (Fig. 2.2) o al interactuar con la costa. Debido a que los tiempos de llegada a cada uno de estas zonas es diferente, se realizaron cálculos por separado. Junto a esto se obtuvo el porcentaje de partículas promedio que llega a cada zona. Este valor se obtuvo para el total de partículas emitidas durante la simulación y para las diferentes agrupaciones de las mismas. Estas agrupaciones corresponden a diferencias de densidad en las partículas (d1: 0.8 gr/cm^3 , d2: 1.725 gr/cm^3 , d3: 2.65 gr/cm^3), emisario por el cual son liberadas (E1:

Coronel Norte, E2:Coronel Sur, E3: Lota, E4: San Pedro) y por período de estudio (P1: Período 1, P2: Período 2, P3: Período 3, P4: Período 4).

2.2.3. Análisis de trayectorias de contaminantes: Trayectorias preferidas versus zonas impactadas

Para simplificar el análisis de las simulaciones obtenidas, se realizó una separación entre las partículas que hacen *beaching* y aquellas partículas que circulan al interior del GA. Esto se realizó con la intención de analizar las trayectorias preferidas por los contaminantes independientemente de las zonas costeras más impactadas. Se estudió la trayectoria de partículas en cada paso de tiempo y al momento en que una partícula detenía su advección fue retirada del sistema. La información de latitud, longitud y tiempo en el que se detuvo fue guardado para el análisis de impacto en la costa, mientras que la trayectoria previa fue utilizada para generar mapas de concentración y circulación al interior del GA.

Mapas de concentración y circulación al interior del GA

Se utilizaron las trayectorias de aquellas partículas que circulan en el GA. Con esta información, se generaron matrices de concentración diaria para todas las partículas liberadas en cada período estudiado. Estas matrices fueron generadas a partir de un regillado de la zona de estudio en el que se separó la zona de estudio en 2500 zonas, como se muestra en la figura 2.4. Para obtener estas matrices, se evaluó el número de partículas al interior de cada una de las zonas para cada paso de tiempo. Junto con lo anterior y para analizar el impacto diferenciado en la columna de agua, se obtuvieron matrices de concentración para diferentes secciones de profundidad. Estas secciones correspondieron a 20 metros, entre 20 y 40 metros y bajo los 40 metros. Las profundidades fueron seleccionadas para analizar el impacto de las corrientes previamente estudiadas (a 5, 25 y 50 metros).

Finalmente, y para suavizar anomalías en la trayectorias de contaminantes, se realizaron promedios de estas matrices de acuerdo al período de estudio deseado. Los intervalos de tiempo seleccionados para este caso correspondieron a los promedios estacionales (primavera, verano, otoño e invierno). Los promedios estacionales fueron separados de acuerdo a la estacionalidad encontrada en las variables oceánicas (Tabla 3.1).

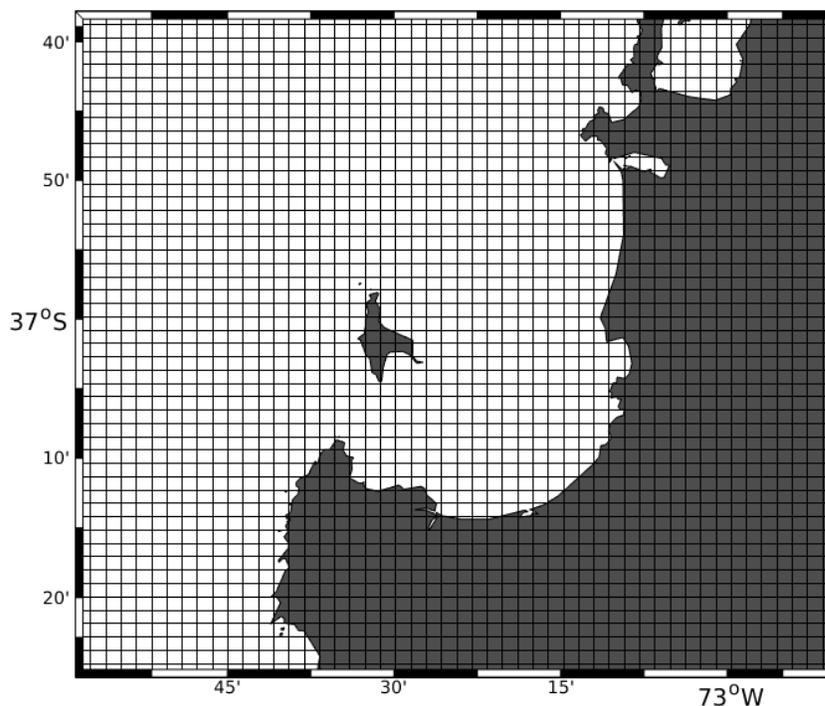


Figura 2.4: *Grillado en el que se separó la zona de estudio para analizar la concentración de partículas.*

Impacto en la costa

Para determinar el impacto en la costa, se estudiaron todas aquellas partículas que realizaron *beaching* durante la simulación. Estas partículas, que dejan de circular en el sistema, se alojan en la costa e impactan los sedimentos y playas. Este impacto depende del tipo de contaminante, de la concentración de estos elementos y del tipo de sedimentos que posea el cuerpo receptor. Dado que esta información no se encontró disponible para este trabajo, se estudió el impacto por medio de la cantidad de partículas que llegaron al cuerpo receptor. Para analizar la variabilidad temporal discutida en esta investigación, se estudió el total de partículas que llegaron por estación. Para determinar la variabilidad espacial del impacto, se seleccionaron 19 zonas que cubren la costa de la zona de estudio, como se observa en la figura 2.5.

Luego, para identificar la contribución relativa de cada emisario a las zonas impactadas se realizó una descomposición de todas las partículas que llegan a las zonas costeras de acuerdo al emisario de origen y a la densidad de las partículas.

Por último se generó un índice (I/v) para cuantificar la variabilidad estacional de llegada a cada zona. Este índice es la razón entre el promedio de partículas que

llegan a diario durante invierno \bar{I}_p y verano \bar{V}_p .

$$I/V = \frac{\bar{I}_p}{\bar{V}_p} \quad (2.3)$$

En este trabajo se utilizó el promedio de los períodos estudiados para obtener solo un valor para cada zona

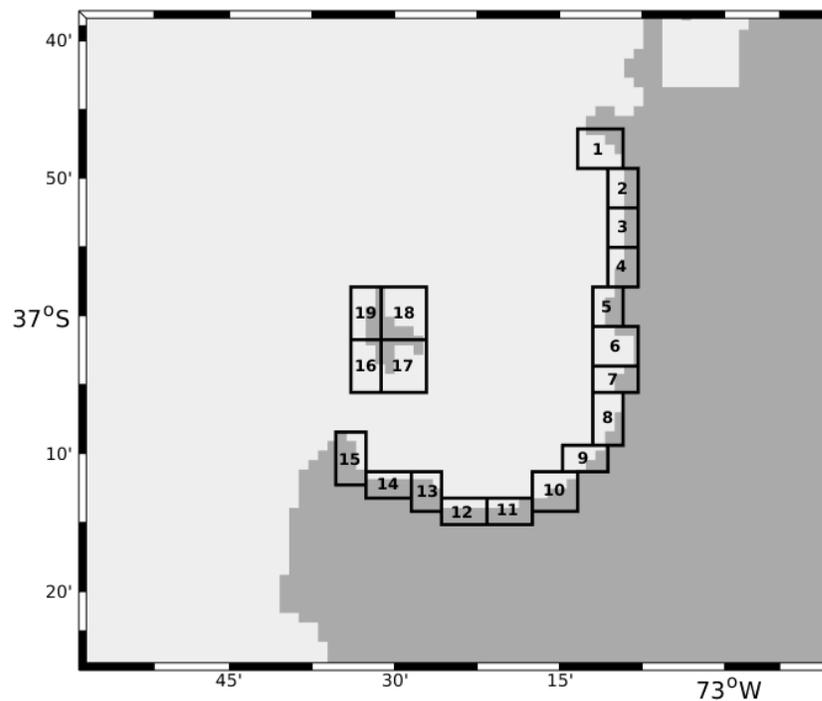


Figura 2.5: Zonas en las que se estudia el impacto en la costa. Zona 1: Desembocadura RBB, Zona 2: San Pedro 1, Zona 3: San Pedro 2, Zona 4: San Pedro 3, Zona 5: Coronel Norte, Zona 6: Coronel Sur, Zona 7: Lota, Zona 8: Colcura, Zona 9: Laraquete, Zona 10: Arauco 1, Zona 11: Arauco 2, Zona 12: Arauco 3, Zona 13: Tubul, Zona 14: La Cal, Zona 15: Punta Lavapie, Zona 16: Isla Santa María SW, Zona 17: Isla Santa María SE, Zona 18: Isla Santa María NE, Zona 19: Isla Santa María NW

Capítulo 3

Resultados

3.1. Ciclo anual del Golfo de Arauco

Los espectros de ondeletas obtenidos de las series de tiempo extraídas del modelo presentaron un máximo energético a los 12 meses. Este resultado se replicó a lo largo los 12 puntos estudiados (Fig. 2.3) y en todas las variables analizadas (salinidad, temperatura y corrientes). Un ejemplo de estos resultados se observa en la figura 3.1 donde se presenta el análisis de ondeletas de la salinidad para el punto $73^{\circ} 24' W$, $36^{\circ} 57' S$. Al igual que en esta figura, todas las ondeletas presentaron máximos de energía en otras frecuencias, sin embargo en ningún caso fueron estadísticamente significativas. Debido a esto, este trabajo se enfocó en el ciclo anual del GA.

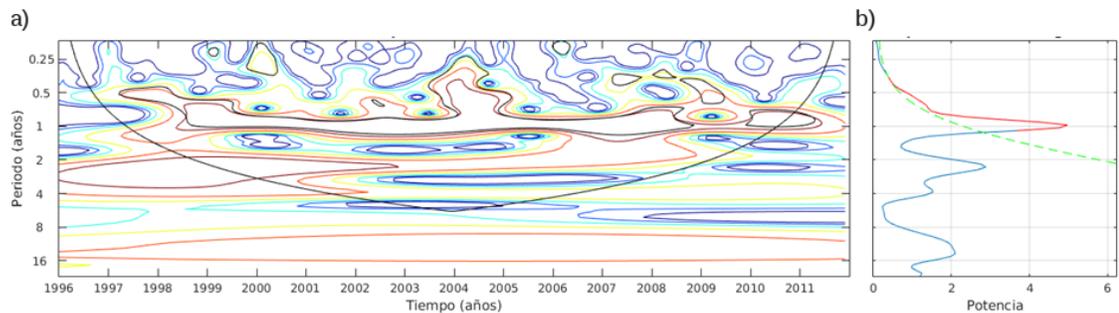


Figura 3.1: Análisis de ondeleta de la variable salinidad para el punto $73^{\circ} 24' W$, $36^{\circ} 57' S$. a) Poder espectral de salinidad y b) Espectro global de salinidad. Se nota un aporte a la varianza de la señal anual y decadal, aunque esta última no es confiable por encontrarse fuera del cono de significancia.

3.1.1. Corrientes al interior del Golfo de Arauco

La circulación analizada a partir de los promedios mensuales de corrientes del año climatológico presentó 2 estaciones muy definidas. Esto se apreció tanto para los 5 (Fig. 3.2), como para los 50 metros (Fig. 3.3). Desde noviembre a febrero se observaron las condiciones de verano, mientras que desde mayo a agosto se observó un patrón de invierno. Los meses entre estos períodos presentaron características de ambos períodos de mayor o menor forma, por lo que fueron considerados como meses de transición. Debido a esta marcada separación, se calculó el índice de estabilidad para las estaciones mencionadas anteriormente. Para este análisis se usaron los promedios mensuales de corrientes utilizados para calcular el año climatológico.

Tabla 3.1: *Períodos determinados para las estaciones oceanográficas.*

Otoño	Marzo y Abril
Invierno	Mayo, Junio, Julio y Agosto
Primavera	Septiembre y Octubre
Verano	Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero

El patrón de corrientes observado en verano mostró una estructura dirigida predominantemente al norte. En la zona oceánica estas corrientes mostraron intensidades entre los 15 y 25 cm/s . Junto a esto se observó un jet en la zona oeste de PL que superó los 35 cm/s (Fig. 3.2a,b,k,l). Esta intensa corriente se separó en ISM, donde una parte ingresó al GA por BC (15 cm/s), mientras que la otra siguió su recorrido al norte (27 cm/s) volviendo a unirse al norte del GA. En profundidad (50 metros) la corriente sufrió la misma separación que en superficie con corrientes cercanas a los 10 cm/s (Fig. 3.3a,b,k,l). Junto con lo anterior, se advirtió la presencia de una circulación ciclónica y anticiclónica en la zona NE de la ISM. Esto pudo ser el resultado de la interacción entre la corriente que viaja al interior del GA con la corriente que viaja al exterior. Este comportamiento se mantuvo a lo largo de la columna de agua, disminuyendo la intensidad de la corriente con la profundidad. Al sur del GA, las corrientes disminuyeron tanto en intensidad como en estabilidad, esto se observó en superficie y en el fondo (Fig. 3.4a). Sin embargo en el fondo se observó una corriente costera de mayor estabilidad (Fig. 3.5a), la cual comienza al centro de la costa este del GA y fluye bordeando la costa hacia el sur. Esta corriente se extendió entre los 20 y 50 metros con intensidades de 5 a 7 cm/s . Al bordear la zona sur del GA, se presentó una interacción con el flujo que ingresa por la BC lo que generó una circulación ciclónica en la zona sur del GA.

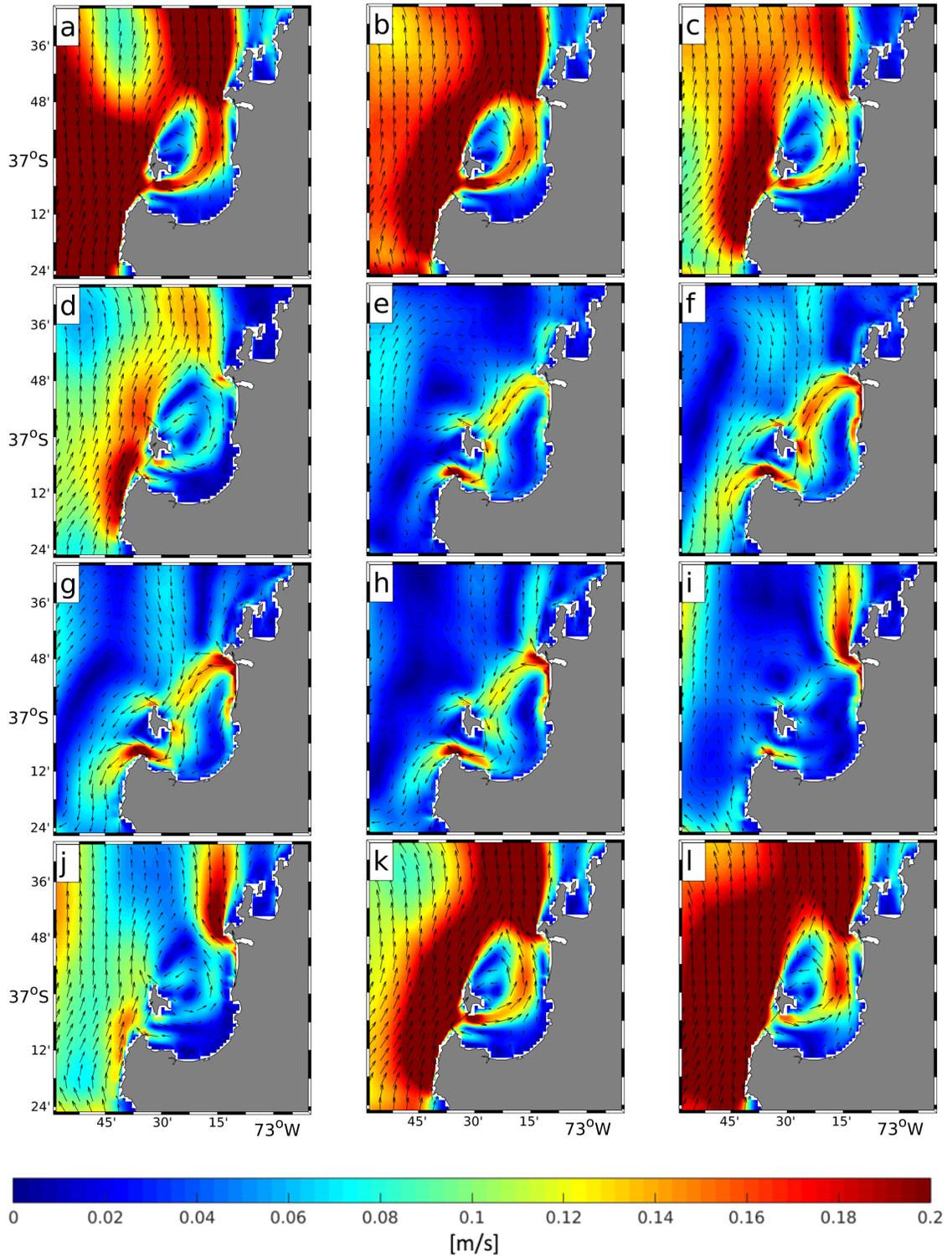


Figura 3.2: Promedio mensual de corrientes a los 5 metros de profundidad para a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril e) Mayo, f) Junio, g) Julio, h) Agosto, i) Septiembre, j) Octubre, k) Noviembre y l) Diciembre.

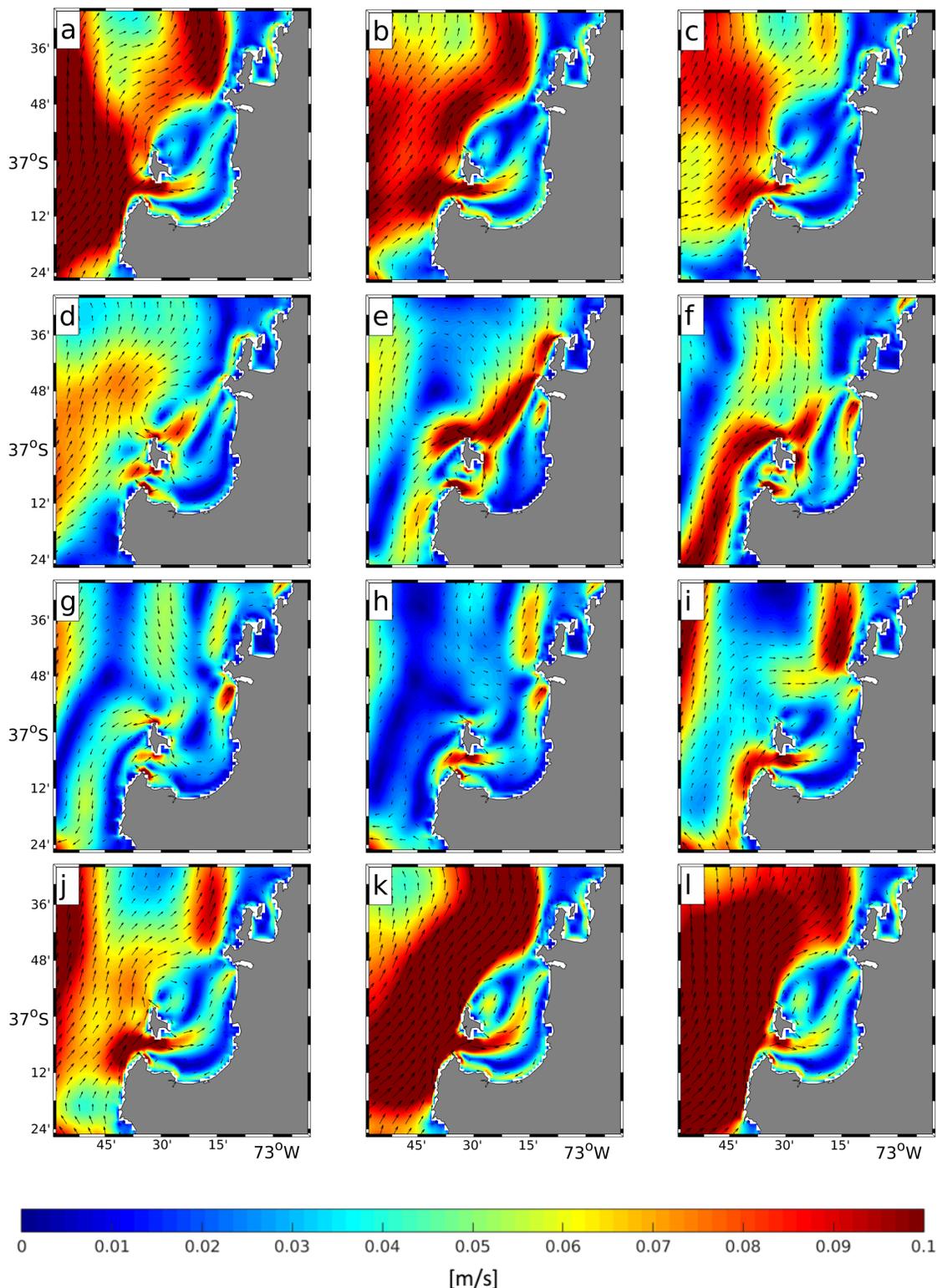


Figura 3.3: Promedio mensual de corrientes a los 50 metros de profundidad para a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril e) Mayo, f) Junio, g) Julio, h) Agosto, i) Septiembre, j) Octubre, k) Noviembre y l) Diciembre.

En los meses siguientes se observó una evolución de la circulación hacia un patrón de invierno. Durante marzo la distribución y dirección de corrientes se mantuvo similar a lo observado en verano, tanto en superficie (Fig. 3.2c) como en el fondo (Fig. 3.3c). Sin embargo, la intensidad de las corrientes disminuyó notoriamente, tanto al interior del GA como en la zona oceánica. Para abril (Fig. 3.2d y 3.3d) aún prevalecieron algunas características del verano, como la corriente hacia el sur que bordea la costa en el fondo (5 cm/s), la corriente oceánica dirigiéndose al norte y el jet al oeste de PL (20 cm/s), no obstante, las magnitudes de estas corrientes son mucho menores. Se presentaron nuevas características como la intensificación de las corrientes al noreste de ISM, que alcanzaron valores de 8 cm/s en superficie. Debido a esta intensificación, el anticiclón ubicado al norte de ISM se trasladó hacia el centro del GA limitando la circulación ciclónica presente en la zona de la cabeza del GA, confinándola a la BC. Este cambio de patrón introdujo una disminución en la estabilidad de las corrientes (Fig. 3.4b y 3.5b).

Desde mayo a agosto se observó el patrón de corriente de invierno (Fig. 3.2e-h y 3.3e-h). Durante este período las corrientes fueron mayormente hacia el sur y mostraron una disminución en la magnitud promedio de la zona de estudio en comparación a lo observado en verano. Junto a esto, el invierno presentó una estabilidad menor (Fig. 3.4c), lo que indicó la existencia de variaciones más significativas entre los meses pertenecientes al período. En superficie se observó la formación de una corriente que sale desde la desembocadura del RBB, muy probablemente debido al aumento de caudal observado durante los meses de invierno. Esta corriente se unió a la corriente costera que ingresa por la BG generando una circulación intensa ($15 - 20 \text{ cm/s}$ en superficie) con dirección a la ISM. Al impactar con la ISM, esta corriente se separó en dos, una rama oceánica que fluyó al sur con velocidades menores a los 10 cm/s y una que rodeó la costa oriental de la ISM y salió del GA por la zona centro sur de BC superando los 20 cm/s . Estas corrientes se unieron nuevamente en la zona oceánica y fluyeron al sur. Cabe mencionar que esta corriente es la más característica del período de invierno ya que presentó la mayor magnitud y estabilidad ($>80\%$) (Fig. 3.4c). En el fondo se observaron dos corrientes que dominaron la circulación del GA, una anticiclónica que se origina de la corriente intensa observada en superficie y otra ciclónica centrada en la BC. La primera mostró magnitudes de 10 cm/s en mayo y junio (Fig. 3.3e-f) y 3 cm/s en julio y agosto (Fig. 3.3g-h) y se extendió a lo largo del GA, la segunda se mantuvo debido a un pequeño flujo hacia el interior del GA al sur de la ISM. A esta profundidad la corriente costera presentó una dirección contraria a la observada en superficie debido a la circulación anticiclónica al centro del GA.

Por último, septiembre y octubre (Figuras 3.2 i-j y 3.3 i-j) representaron el período de transición del patrón de invierno a verano. Durante septiembre se observaron todas las corrientes características superficiales de invierno con una estabilidad e intensidad menor (Fig. 3.4d), también se presentó la corriente al norte que se origina en la desembocadura del RBB con intensidades mayores que las observadas en agosto. Sin embargo las corrientes oceánicas promedio fueron hacia el norte, una característica presente en los meses de verano. En profundidad en cambio, las corrientes mostraron un patrón de verano durante ambos meses, con la presencia de la circulación ciclónica y anticiclónica en la zona norte y oeste de ISM, una débil corriente costera al sur y corrientes que entran al GA por la BC. Estas corrientes además presentaron una alta estabilidad (Fig. 3.5d). Este comportamiento insinuó un desfase entre el comportamiento de superficie con el fondo, en particular considerando que las corrientes superficiales de octubre presentan un patrón débil de verano.

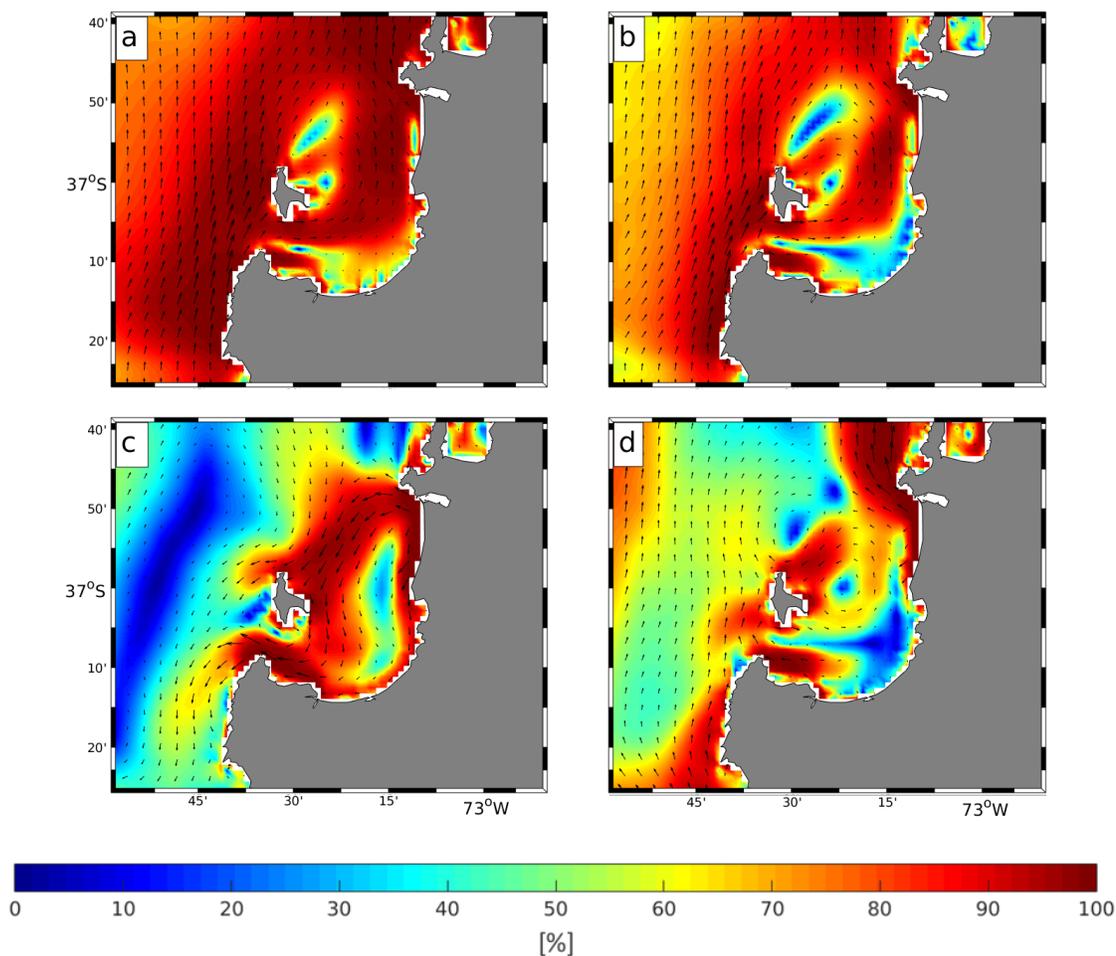


Figura 3.4: Estabilidad de las corrientes a los 5 metros para a) verano, b) otoño, c) invierno, d) primavera.

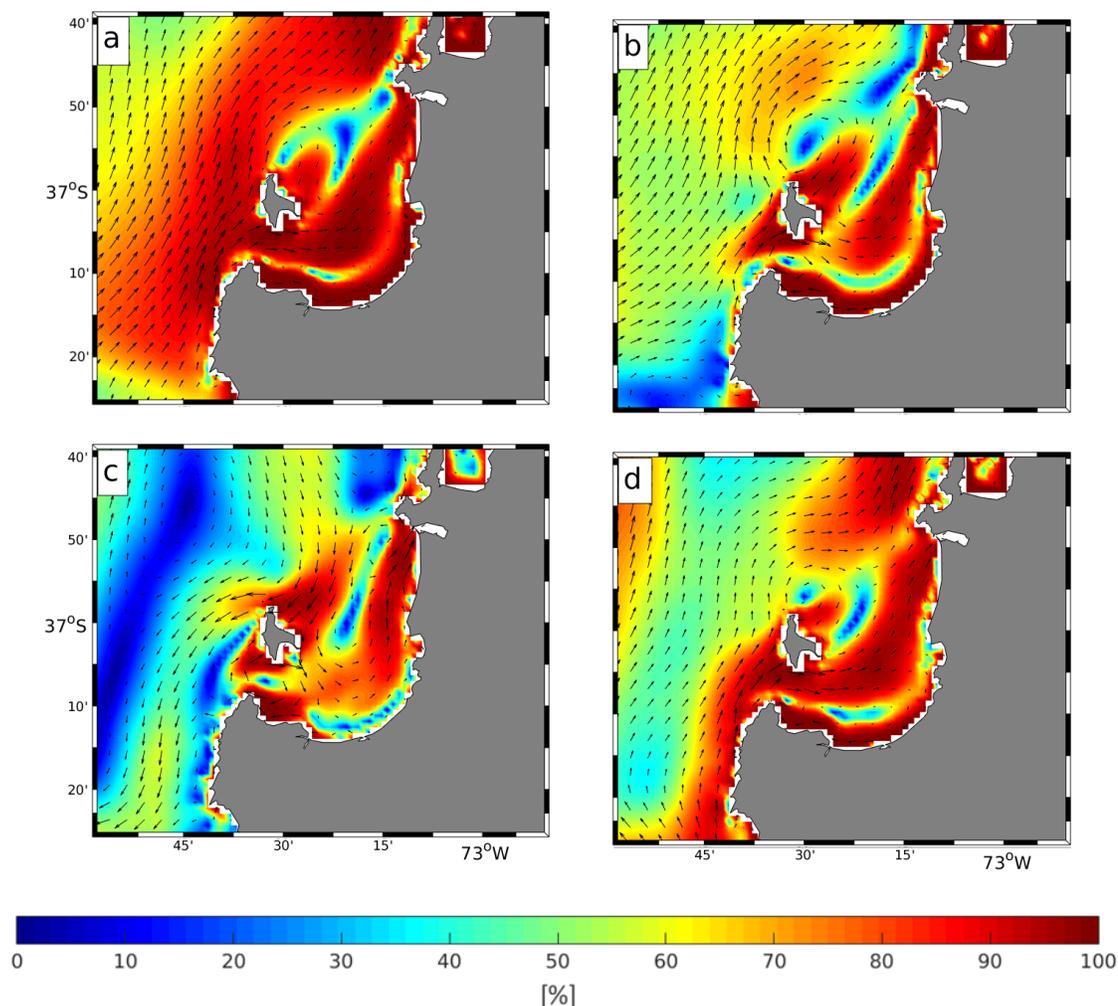


Figura 3.5: Estabilidad de las corrientes a los 50 metros para a) verano, b) otoño, c) invierno, d) primavera.

3.1.2. Circulación en la Boca Chica

Una de las características más importantes de la circulación del GA es la presente en BC. En esta zona se observó un comportamiento ciclónico durante todo el año, con variaciones que dependieron de la circulación estacional dominante en el GA. Esta circulación presentó una alta estabilidad en superficie y en el fondo (Fig. 3.4 y 3.5). Se utilizó el corte BC (Fig. 2.2) para analizar su variación a lo largo del ciclo anual.

Durante verano (Fig. 3.6a) la corriente al norte de la BC tuvo una dirección de entrada al GA con corrientes cercanas a los 20 cm/s . Esta corriente se extendió hasta el centro de la BC, mientras que al sur presentó corrientes en la dirección contraria con valores que rondan los 5 cm/s . En otoño (Fig. 3.6b) el comportamiento de las corrientes se mantuvo, sin embargo las corrientes con dirección de entrada al GA

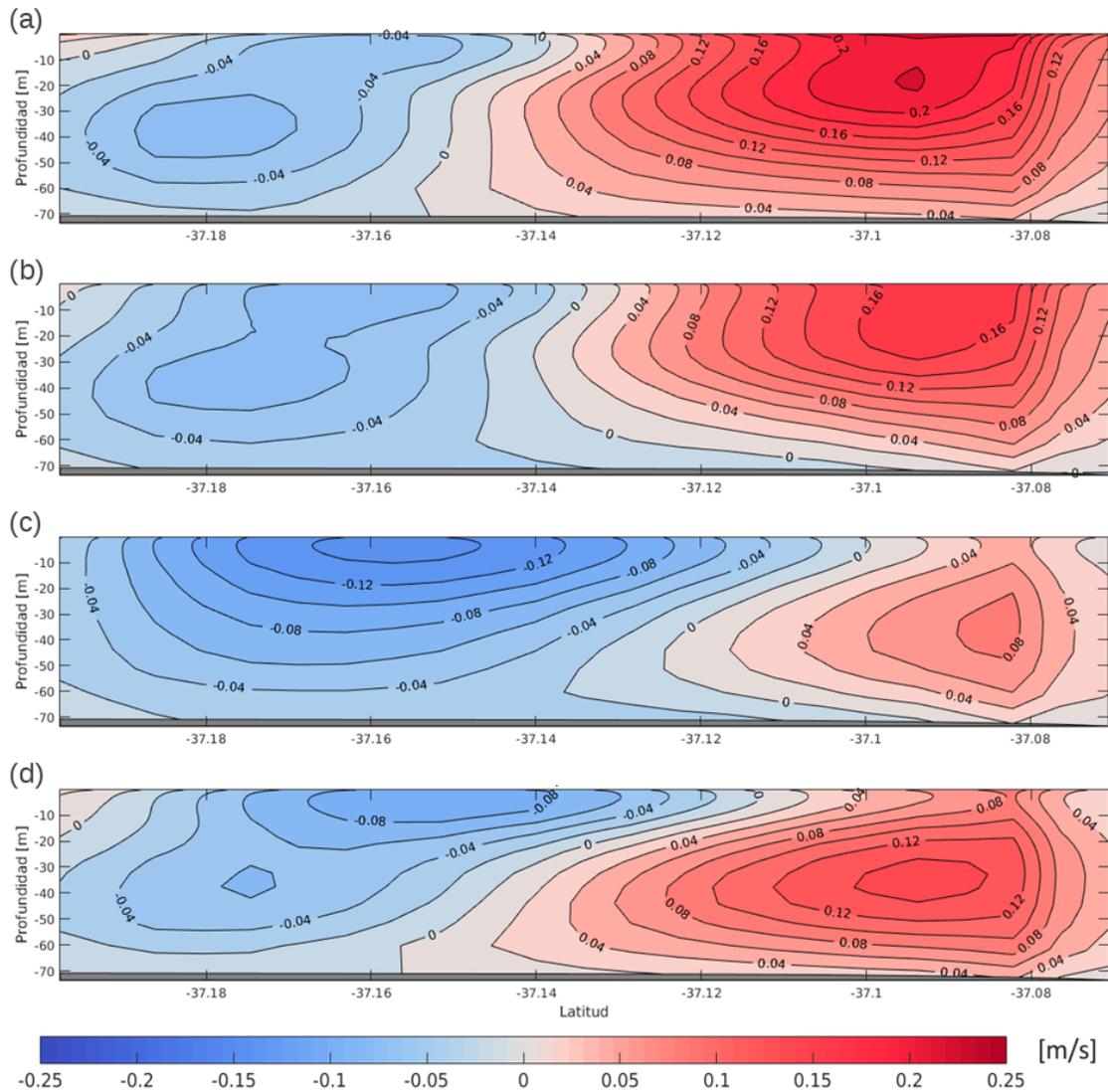


Figura 3.6: *Componente u de la corriente a través de la sección BC para a) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera del año climatológico. Las corrientes positivas (rojo) indican entrada al GA, las negativas (azules) indican salida.*

disminuyeron y las corrientes hacia el sur comenzaron a aumentar. En invierno (Fig. 3.6c) se observó un cambio en el patrón de circulación previamente descrito. La corriente de entrada al GA se mantuvo confinada a los primeros 3 kilómetros al norte de la sección con velocidades promedio de 7 cm/s . La corriente con dirección hacia el océano se extendió a lo largo de toda la zona centro-sur de la sección con magnitudes que alcanzan los 15 cm/s . Esta corriente disminuyó con la profundidad pero mantuvo la dirección. En primavera (Fig. 3.6d) se observó un aumento en la extensión de la corriente que fluye al interior del GA junto con un aumento en la magnitud. Nuevamente se observó que bajo los 40 metros la corriente presenta un

patrón de circulación más cercano a lo descrito en verano que durante invierno.

3.1.3. Circulación en la Boca Grande

La BG1 a diferencia de la BC presentó mayor variabilidad temporal en la dirección de las corrientes a lo largo de las estaciones estudiadas. Ésta pasa de un comportamiento de doble capa durante verano y primavera a un comportamiento de una capa en invierno.

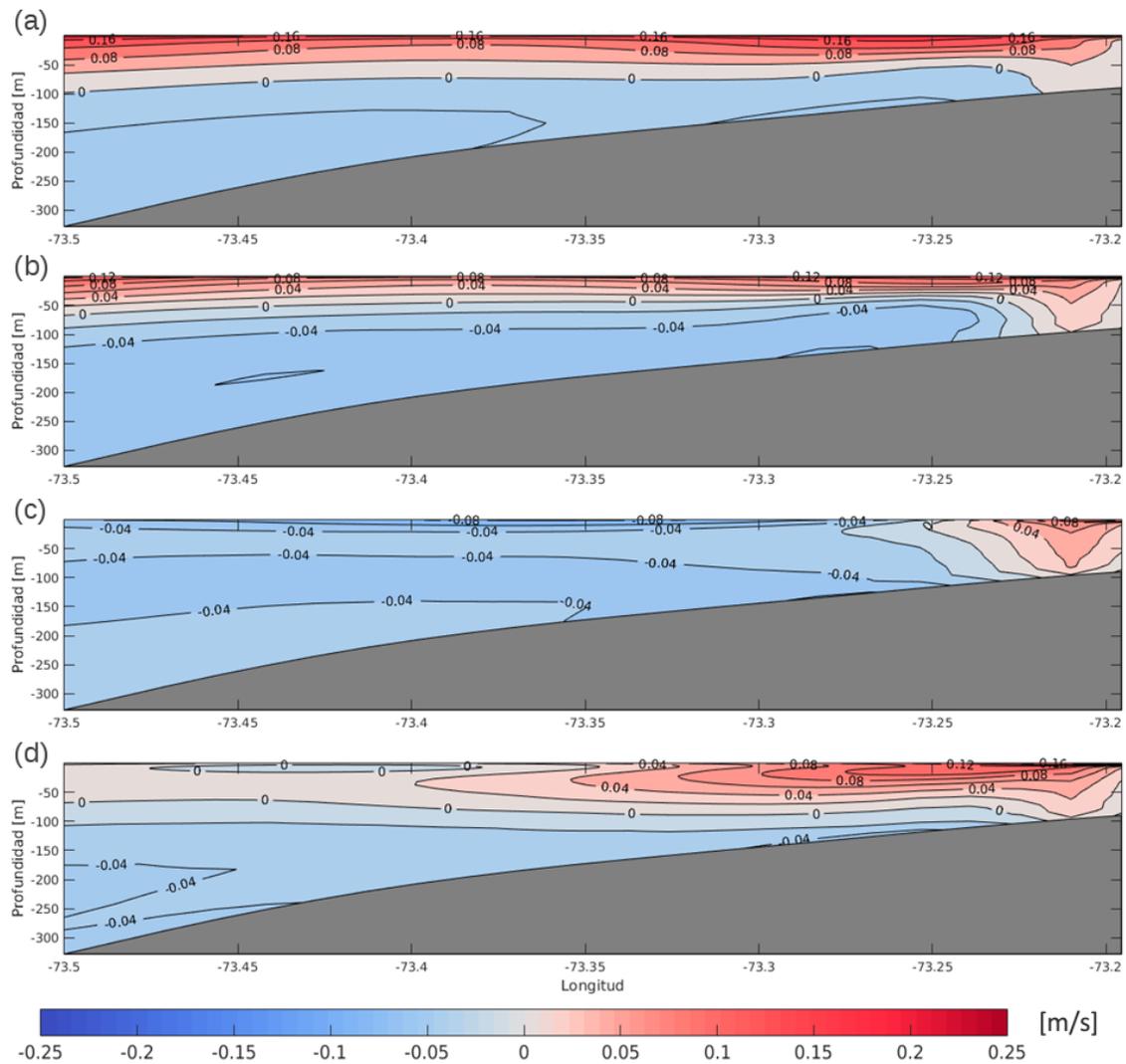


Figura 3.7: *Componente v de la corriente a través de la sección BG1 para a) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera del año climatológico. Las corrientes negativas (azul) indican entrada al GA, las positivas (rojas) indican salida.*

En verano se observó un comportamiento de doble capa. En superficie la corriente

presentó una dirección hacia el norte con intensidades que superaron los 15 cm/s y que se debilitaron con la profundidad (Fig. 3.7a). Bajo los 50 metros la corriente fue muy débil (0.5 cm/s) en toda la zona interior del GA. La zona más oceánica, que alcanza los 300 metros de profundidad, presentó una corriente de 5 cm/s hacia el interior del GA. En otoño (Fig. 3.7b) las corrientes al norte se volvieron más superficiales y débiles. Las corrientes superficiales apenas superaron los 10 cm/s y a los 35 metros solo alcanzan los 5 cm/s . Bajo los 60 metros la corriente fue mayoritariamente al sur con corrientes cercanas a los 2 cm/s la cual aumentó levemente con la profundidad. Durante los meses de invierno (Fig. 3.7c) las corrientes fueron prioritariamente hacia el sur (entrada de agua al GA). Aunque se observó la presencia de un flujo costero al norte que ocupó toda la columna de agua. En primavera (Fig. 3.7d) se observó la extensión de la lengua de corriente al norte.

3.1.4. Hidrografía del Golfo de Arauco

Las distribuciones de temperatura, salinidad y sigma-t mensual evidenciaron nuevamente un ciclo anual con dos estaciones muy marcadas, las cuales coincidieron en mayor o menor medida con los períodos previamente mencionados.

Durante el período de verano las temperaturas variaron verticalmente entre los 10 y 14°C (Fig. 3.8a). Éstas presentaron una estructura vertical definida sobre los 40-50 metros. Bajo esta profundidad se observó una capa mucho más homogénea con temperaturas menores a 11°C . Se observó un levantamiento de las isotermas en los primeros 5-7 km de la costa este del GA. La salinidad en cambio mostró una estructura homogénea con valores entre 33.7 y 34.4 psu (Fig. 3.9.a). Se registró un mínimo de salinidad superficial (<33 psu), probablemente por el aporte de agua dulce proveniente del RBB. Durante este período la estratificación fue de nivel medio ($50 < \phi < 100$) para casi toda la zona de estudio, incluyendo la zona oceánica fuera del GA (Fig. 3.10a). Se observó un aumento en la estratificación de la columna de agua en la zona de la desembocadura del RBB. Esto se atribuyó al cambio en la salinidad de la zona debido al ingreso de agua dulce a partir de las descargas del RBB.

En otoño se observó una leve profundización de la estructura de temperatura observada durante el verano (Fig. 3.8b). Sin embargo la distribución espacial relativa de temperaturas se mantuvo prácticamente igual. Lo contrario ocurrió con la salinidad donde se observó el surgimiento de la estructura observada en verano (Fig. 3.10b).

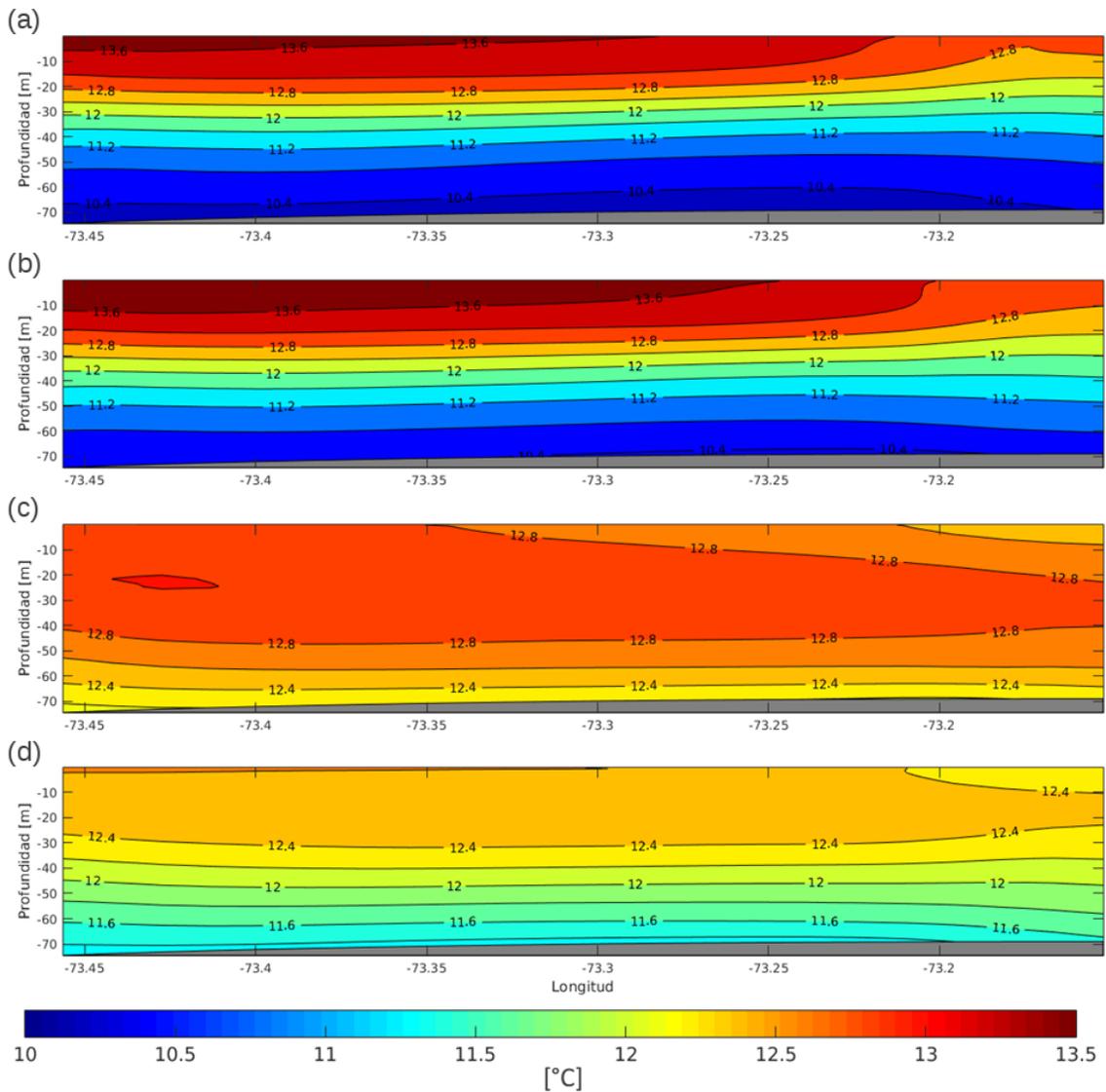


Figura 3.8: *Promedio estacional de temperatura en la sección 2 para a)verano, b)otoño, c)invierno y d)primavera.*

La estratificación del sistema se conservó en un nivel medio, aunque presentó valores más bajos que durante el verano.

Durante el invierno se observó la profundización de las isotermas y la homogeneización de temperaturas en la capa superficial (Fig. 3.8c). La salinidad, en cambio, presentó una estructura vertical mucho más estratificada (Fig. 3.9c), con salinidades menores a 32 psu en superficie. Esta disminución de salinidad se debió al aumento en el caudal del RBB el cual ingresó al GA gracias al cambio de dirección que presentaron las corrientes superficiales durante este período. En esta etapa la estratificación de la columna de agua volvió a aumentar, sin embargo no de forma homogénea en

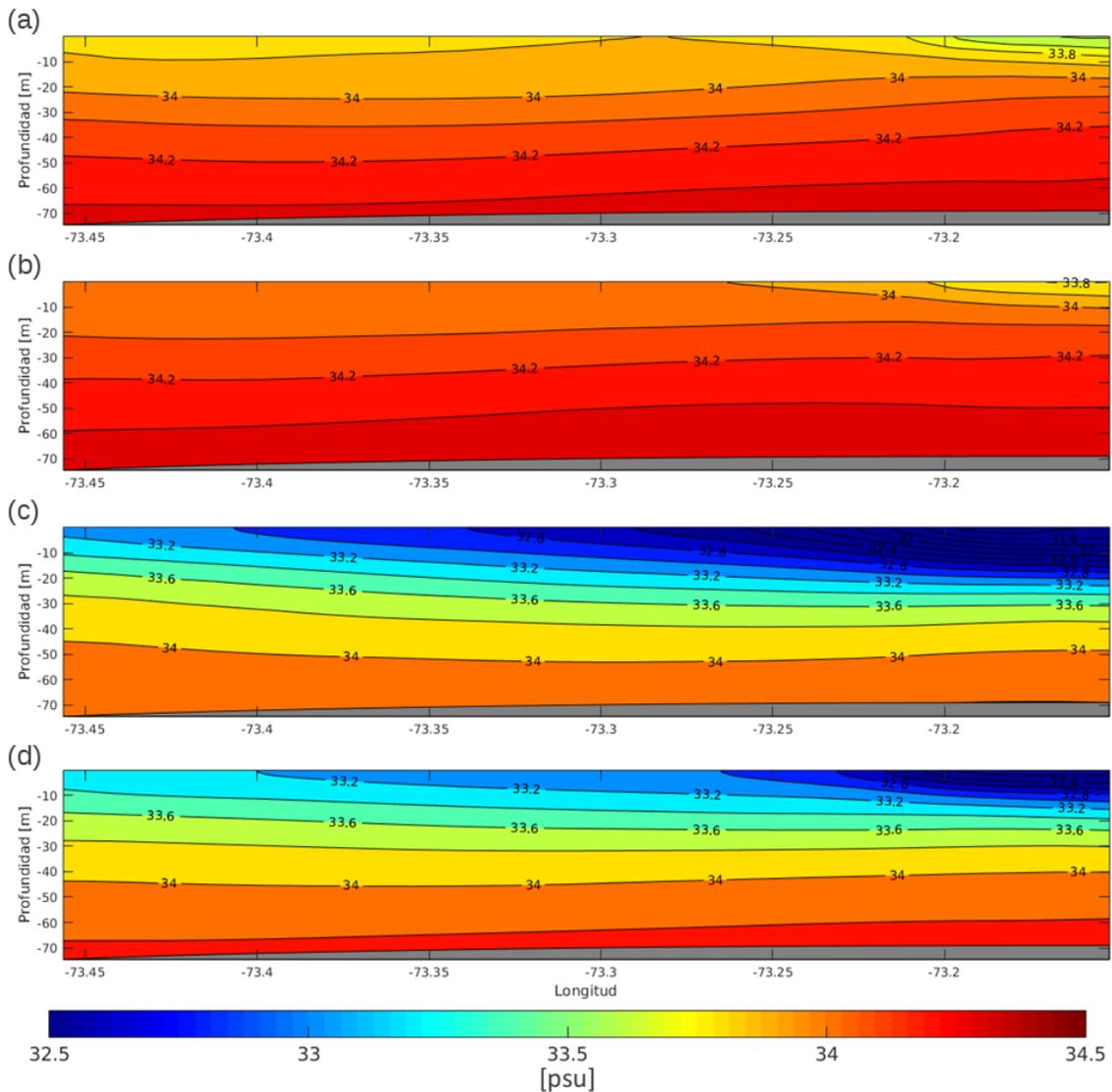


Figura 3.9: Promedio estacional de salinidad en la sección 2 para a) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera.

toda la zona de estudio, sino que de forma progresiva desde la desembocadura hacia el interior del GA. Esto nuevamente se atribuyó al aporte de agua dulce del RBB (Fig. 3.10c).

Finalmente, durante el período de transición de invierno a verano, se observó un retroceso en los procesos previamente mencionados, con la disminución constante de agua menos salina en superficie (Fig 3.9d), el surgimiento de la estructura vertical térmica y la aparición de temperaturas mucho menores en el fondo (11°C) gracias a la intrusión de aguas desde el sur con menores temperaturas (Fig. 3.8d). La estratificación para este período mostró características muy similares a las observadas en el

período de invierno (Fig. 3.10d). Cabe destacar que las características de salinidad y temperatura en el GA muestran una baja variabilidad espacial.

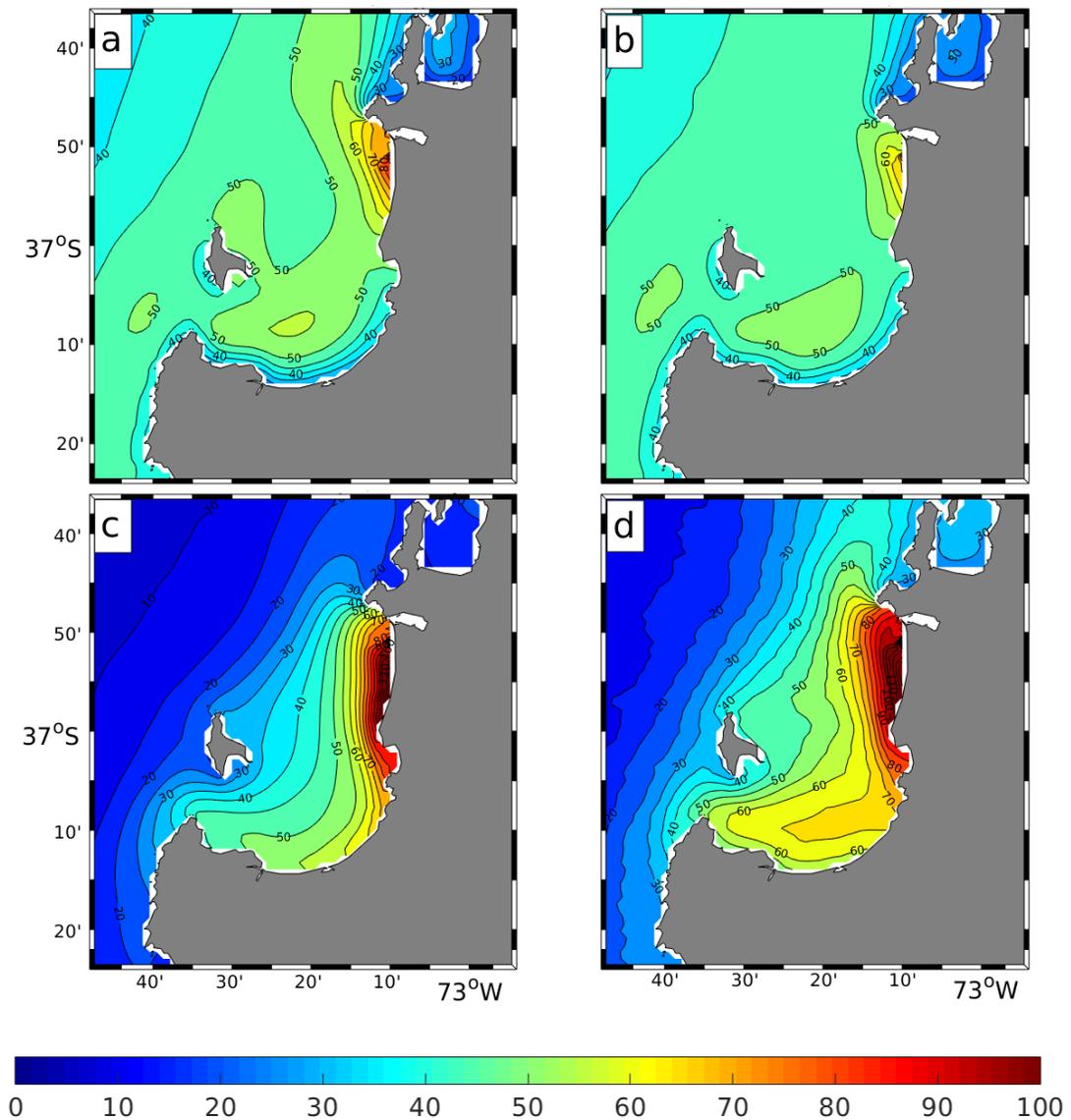


Figura 3.10: Promedios estacionales de la estratificación de columna de agua para a) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera (Baja $\phi < 50$, media $50 < \phi < 100$, alta $\phi > 100$).

3.2. Variabilidad interanual del Golfo de Arauco

En el GA se observó una marcada variabilidad interanual en los patrones de corrientes, salinidad y temperatura. El análisis de ondeletas (Fig 3.1) no permitió distinguir un fenómeno particular que marque esta variación en la estacionalidad,

como por ejemplo el fenómeno de El Niño. Se observaron algunas relaciones entre las desviaciones del ciclo anual con los forzantes del modelo. En particular se observó una relación entre las anomalías de la componente meridional de las corrientes superficiales con la componente meridional del viento mensual.

La figura 3.11 muestra las anomalías que posee la componente meridional de la corriente con respecto al ciclo anual. Estas variaciones fueron en su mayoría intensificaciones y debilitamientos de las corrientes meridionales al interior del GA, ya que sólo en períodos y zonas muy limitadas se observó un cambio en la dirección de la corriente con respecto al año climatológico (Tabla 3.2). En profundidad (50 m) (Fig. 3.11d-f) las anomalías presentaron patrones similares a los observados en superficie (5 m) (Fig. 3.11a-c) pero más débiles. Esto se debió a que la intensidad de las corrientes fue mucho menor. Durante los años 1998 y 1999 las anomalías mostraron una importante intensificación de las corrientes. Esta anomalía positiva, presente en los cortes superficiales de las secciones 1 (Fig. 3.11a) y 2 (Fig. 3.11b) se extendió tanto espacial (a lo largo de la sección) como temporalmente (aproximadamente 12 meses). En la sección 3 (Fig. 3.11c), en cambio, esta anomalía fue débilmente representada en la componente v de la corriente. Esto se atribuyó a que a lo largo de la sección 3, las corrientes presentaron en promedio baja intensidad. Además, la corriente meridional que fluye a lo largo del GA se volvió prácticamente zonal al cruzar por la boca chica (Fig. 3.6). Las anomalías de la componente u de la corriente en la sección 3 y en BC corroboraron esta información, ya que existe una anomalía positiva en la zona oeste de la sección (Figura no incluida). Esta intensificación positiva de las corrientes superficiales son el resultado de un aumento en la magnitud y persistencia de los vientos que se dirigen hacia el norte como se señala en la figura 3.12, donde las velocidades tuvieron una dirección al norte durante 12 meses seguidos (julio 1998 - junio 1999) y superaron en 2 m/s a la magnitud promedio para algunos períodos. Otro período con intensificación positiva de las corrientes fue durante el primer semestre del año 2005. Durante este período también se observó una intensificación positiva, incluso mayor que durante el período 98-99, aunque no se encontró distribuido a lo largo de la sección estudiada. Esta intensificación nuevamente se observó en los cortes superficiales de la sección 1 (Fig. 3.11a) y 2 (Fig. 3.11b) de la componente v de la corriente y en la zona occidental de la componente u de la corriente en la sección 3 (Figura no incluida). Sin embargo, en este caso la serie de tiempo del viento no mostró una intensificación durante el período de verano, sino que durante invierno, cuando éstas poseen una dirección hacia el sur, por lo que las razones del aumento de las corrientes en estas secciones no fueron atribuidas al viento.

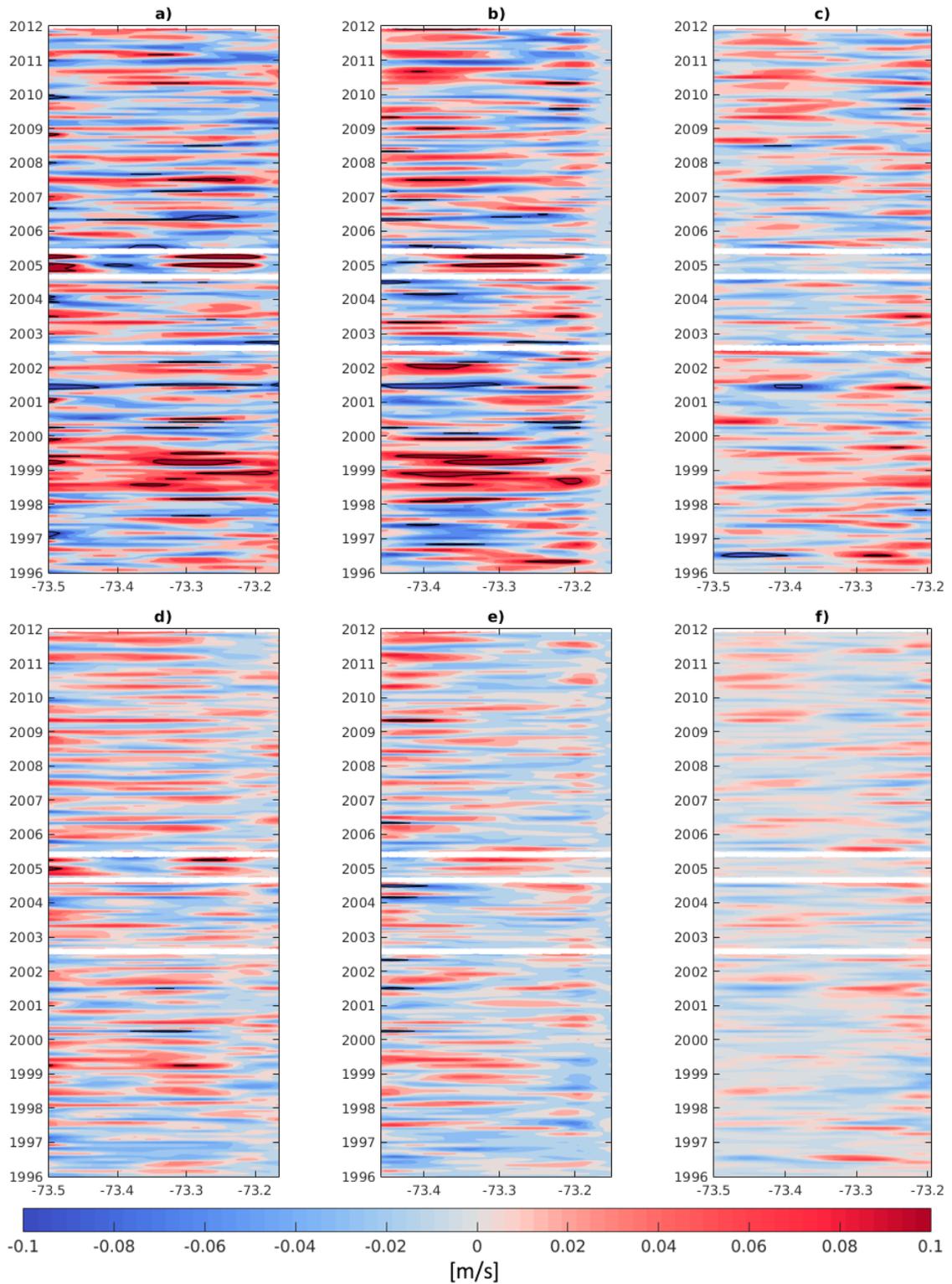


Figura 3.11: Anomalías de la componente meridional (m/s) de la corriente a 5 m (paneles superiores) y 50 m (paneles inferiores) con respecto al año climatológico para sección 1 (a y d), sección 2 (b y e) y sección 3 (c y f). En contornos negros se muestran anomalías que superan los 0.1 m/s.

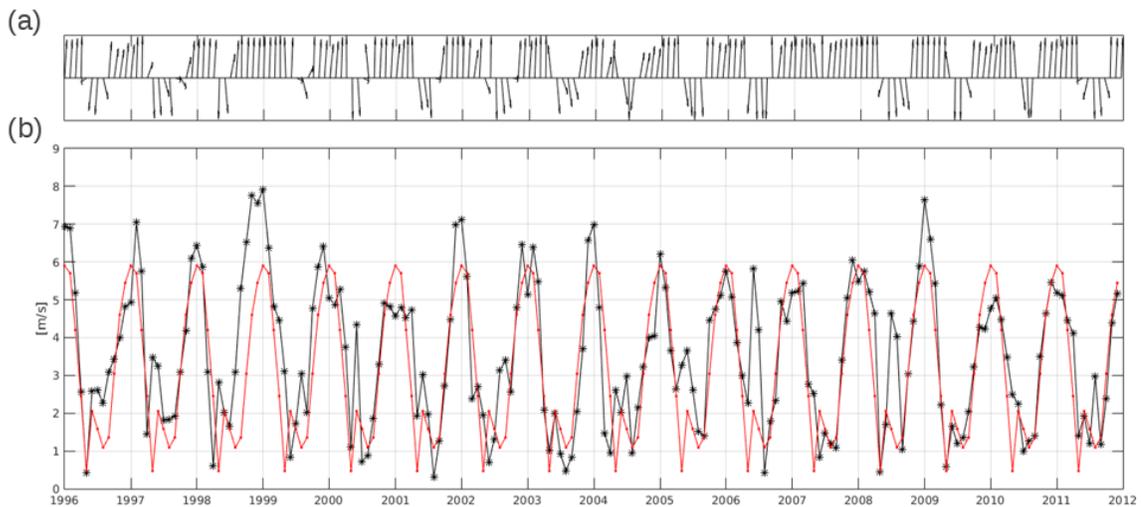


Figura 3.12: a) Dirección y b) magnitud del forzante de viento en el punto $73^{\circ} 24' W$, $36^{\circ} 57' 36'' S$. En el panel b se muestra el promedio mensual de la magnitud del viento utilizado como forzante en el modelo (negro) junto al ciclo anual de la misma (en rojo)

Durante el invierno de 2001 se observó la anomalía negativa más alta en el período de estudio. Debido a esto, las corrientes que se dirigen al sur en este período experimentaron una intensificación en su magnitud. Esta intensificación en las corrientes hacia el sur se observó en las 3 secciones y en ambas profundidades. El viento durante el año 2001 presentó una magnitud levemente menor en verano (-1 m/s) y levemente mayor en invierno ($+1 \text{ m/s}$), lo que podría haber inducido esta intensificación en las corrientes al sur (Fig. 3.12). El caso contrario se observó durante el período invernal del año 2007, donde las corrientes marinas mostraron baja intensidad y dirección norte. Esto se puede atribuir a que la serie de vientos no mostró una dirección al sur en todo el año (Fig. 3.12).

Las figuras 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 muestran la evolución temporal de las anomalías de temperatura y salinidad del GA tanto en superficie como en el fondo. Estas imágenes se obtuvieron a partir del promedio de la anomalía de la sección vertical debido a la poca variabilidad espacial que estas presentaron. Esta baja variabilidad espacial también se percibió a lo largo del GA, ya que las anomalías presentaron series de tiempo muy similares entre secciones. Sin embargo sí se observó variabilidad espacial a lo largo de la profundidad, ya que hubo períodos en los que las anomalías de salinidad poseen signo contrario entre la superficie (Fig. 3.13) y el fondo (Fig. 3.14). Por el contrario, las anomalías de temperaturas no mostraron tal variabilidad.

Las temperaturas presentaron valores menores a los climatológicos en el período

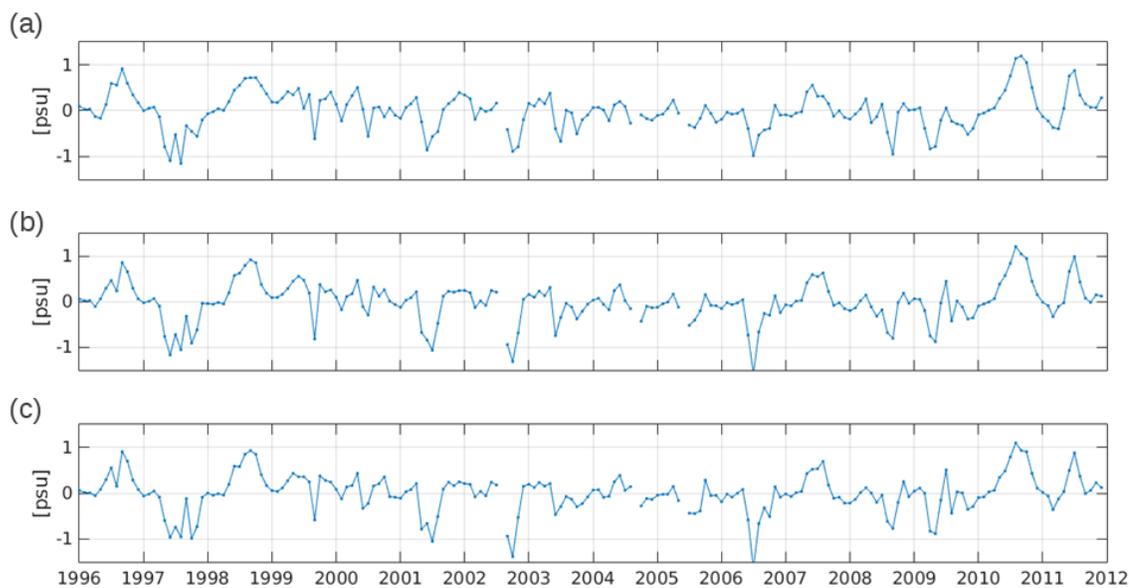


Figura 3.13: Anomalías superficiales (5 metros) de salinidad en las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.

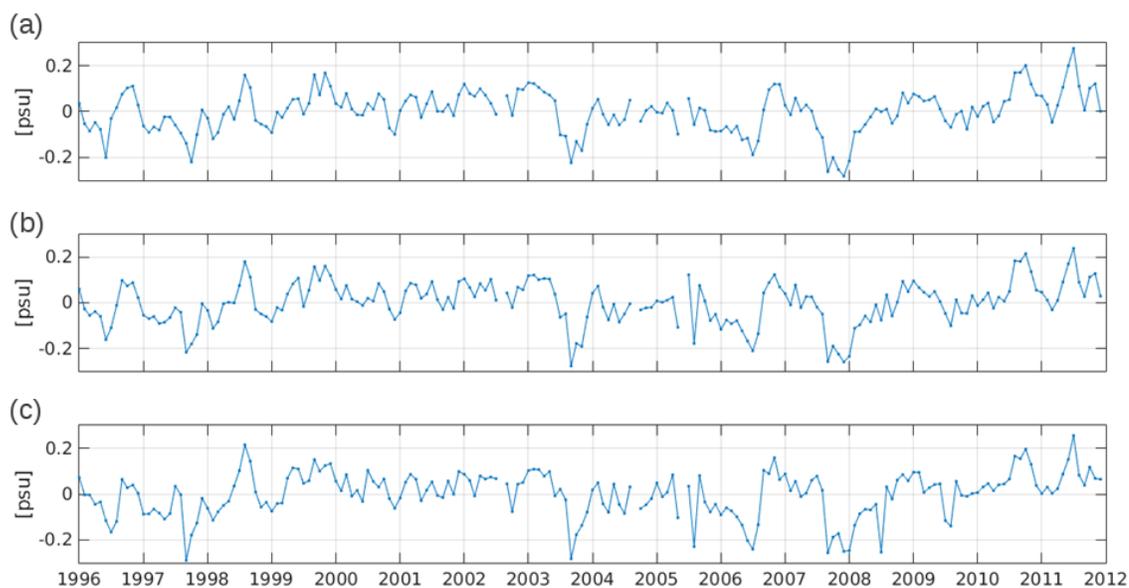


Figura 3.14: Anomalías de salinidad para el fondo (50 metros) de las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.

comprendido entre agosto de 1998 y octubre 1999, alcanzando en noviembre de 1998 la temperatura más baja de toda la simulación (10.8°C) (Fig. 3.15). Durante este intervalo, solo el mes de abril mostró una temperatura mayor al año climatológico. La salinidad para este período también mostró un valor extremo (Fig. 3.13). Los meses de invierno y primavera del año 1998 presentaron la mayor anomalía positiva dentro del intervalo de estudio. El año 2010 mostró características similares en

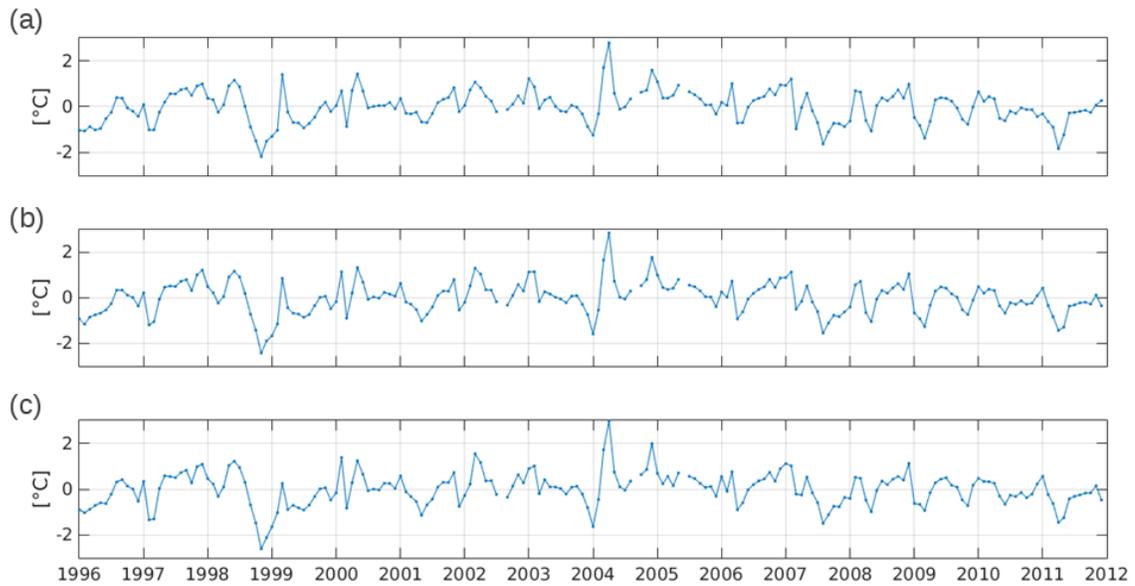


Figura 3.15: Anomalías superficiales (5 metros) de temperatura en las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.

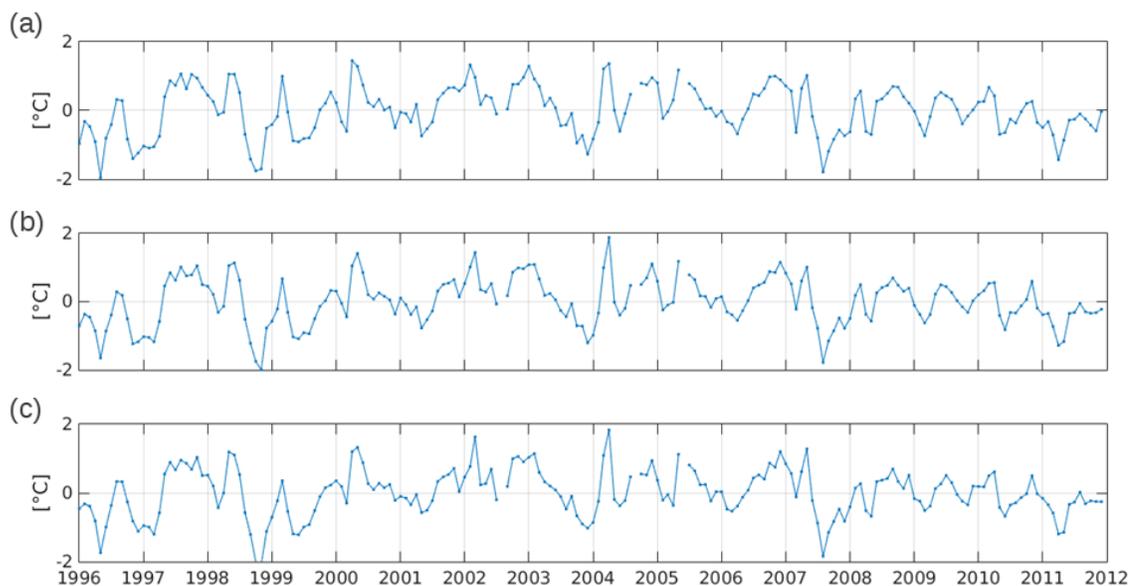


Figura 3.16: Anomalías de temperatura para el fondo (50 metros) de las secciones 1 (a), 2 (b) y 3 (c) con respecto al año climatológico.

salinidad, no obstante la temperatura de este período se mantuvo muy cercana al comportamiento climatológico. Durante el año 1997, 2001 y 2006 se distinguieron importantes anomalías negativas de salinidad para el período invernal, aunque esto no se ve representado en las anomalías de temperatura. Para el otoño de 2004 la temperatura mostró un importante aumento.

Tabla 3.2: Porcentaje de nodos de corriente que mantienen la misma dirección que durante el año climatológico.

	Sección 1		Sección 2		Sección 3	
	5 m.	50 m.	5 m.	50 m.	5 m.	50 m.
U	84.84 %	80.96 %	84.45 %	80.94 %	77.82 %	78.77 %
V	82.56 %	77.23 %	74.49 %	84.35 %	72.38 %	79.98 %
U y V	72.09 %	64.07 %	63.30 %	68.93 %	56.14 %	63.38 %

3.2.1. Períodos escogidos para la simulación de emisión de contaminantes

Se escogieron períodos que presentaron anomalías de corriente extremas durante estaciones diferentes para analizar la influencia de estas variaciones sobre la trayectoria de los contaminantes (Tabla 3.3). Estos períodos cubrieron un intervalo de tiempo de 12 meses para evaluar de mejor forma las diferencias entre los años. Cada uno de estos períodos comienza al inicio de otoño, excepto el período 1 que comienza al inicio de primavera.

Tabla 3.3: Fecha inicial y final de los períodos contrastantes que serán analizados.

	Inicio	Término
Período 1	Septiembre de 1998	Agosto de 1999
Período 2	Marzo de 2001	Febrero de 2002
Período 3	Marzo de 2007	Febrero de 2008
Período 4	Marzo de 2010	Febrero de 2011

A continuación se presentan imágenes de las corrientes estacionales para cada uno de los períodos en los que se evaluaron simulaciones de emisión de contaminantes. Estas imágenes fueron utilizadas para contrastar la dirección de las corrientes en cada estación con las trayectorias que siguieron las partículas simuladas.

Período 1 (Sep/1998 - Ago/1999)

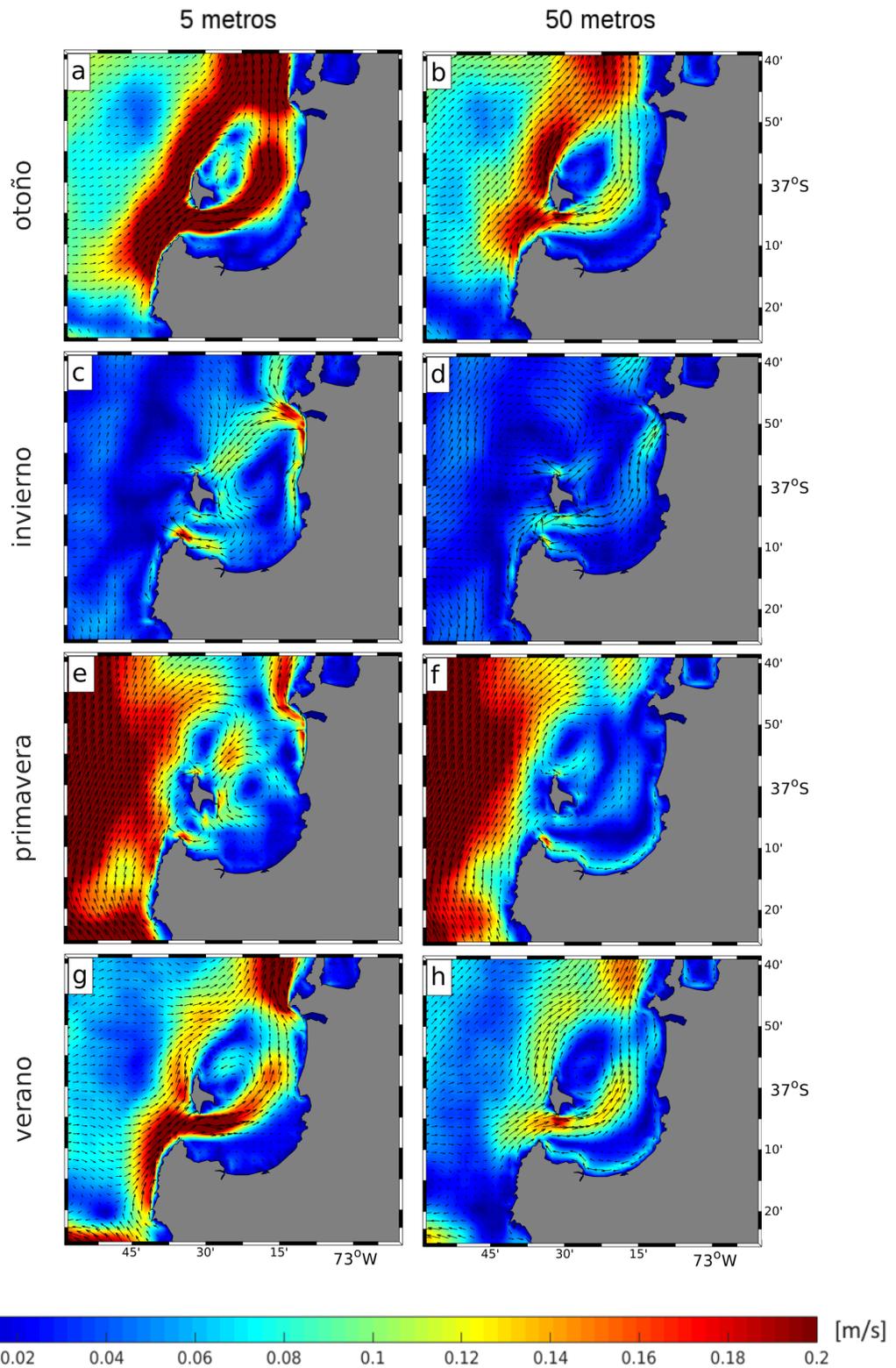


Figura 3.17: Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 1.

Período 2 (Mar/2001 - Feb/2002)

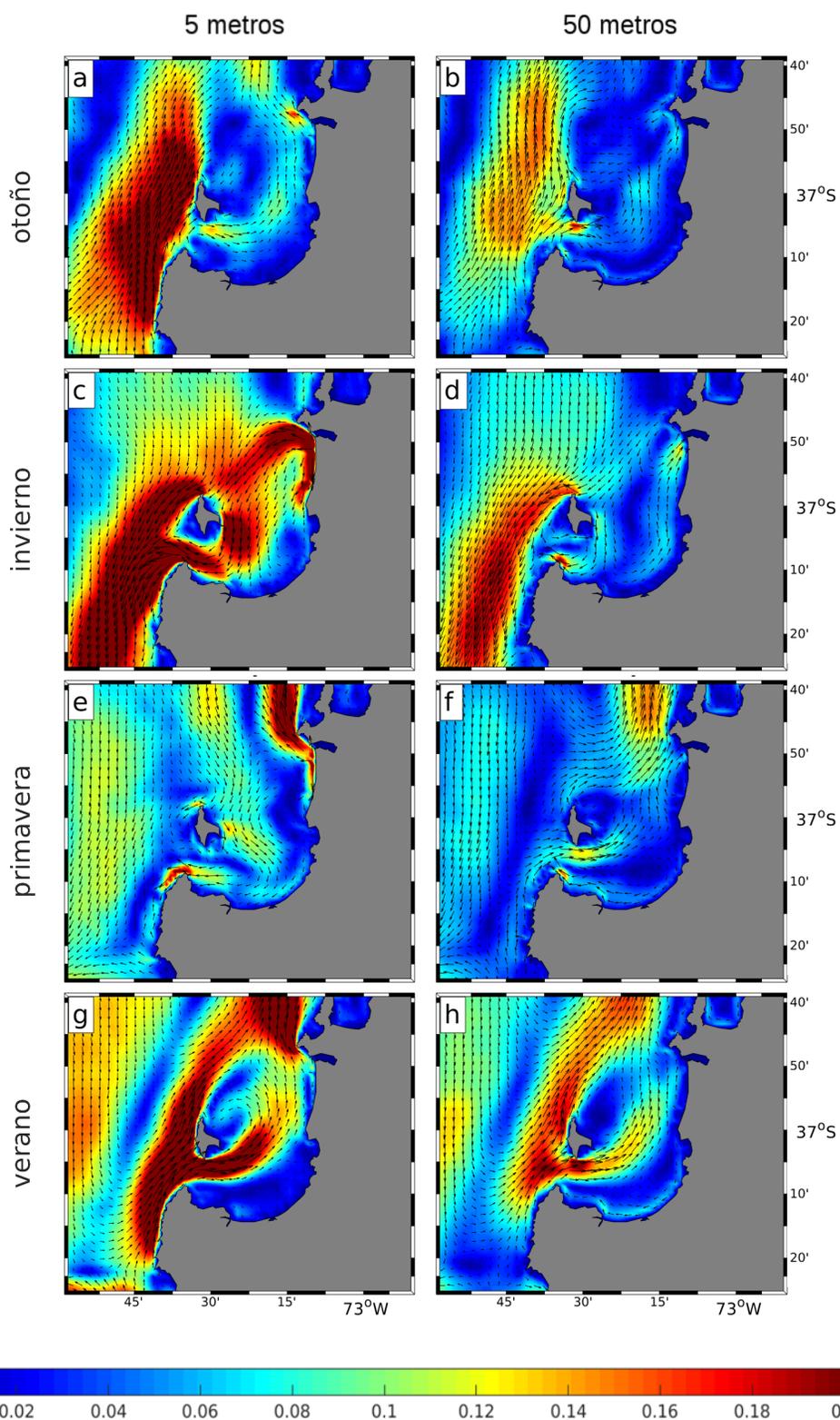


Figura 3.18: Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 2.

Período 3 (Mar/2007 - Feb/2008)

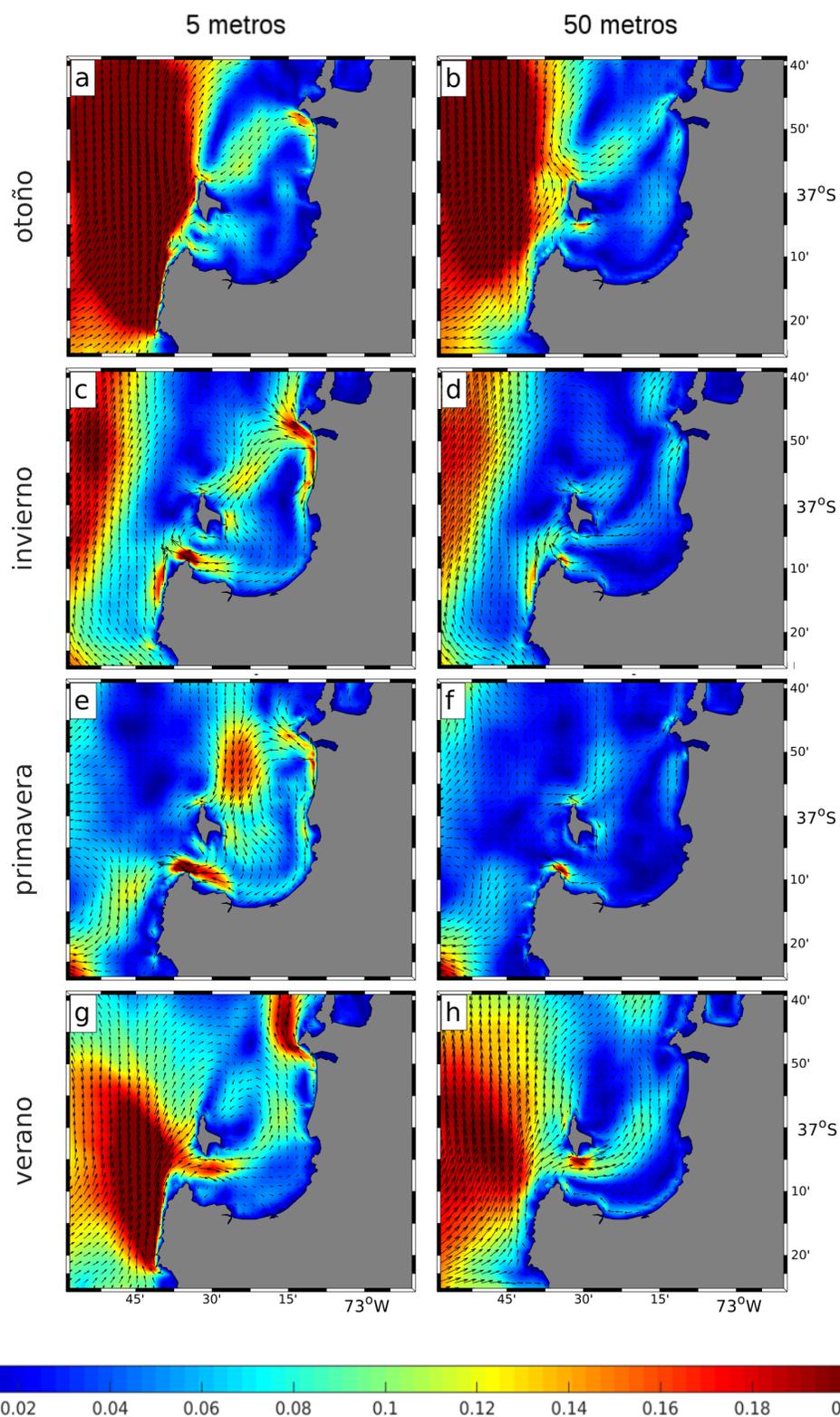


Figura 3.19: Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 3.

Período 4 (Mar/2010 - Feb/2011)

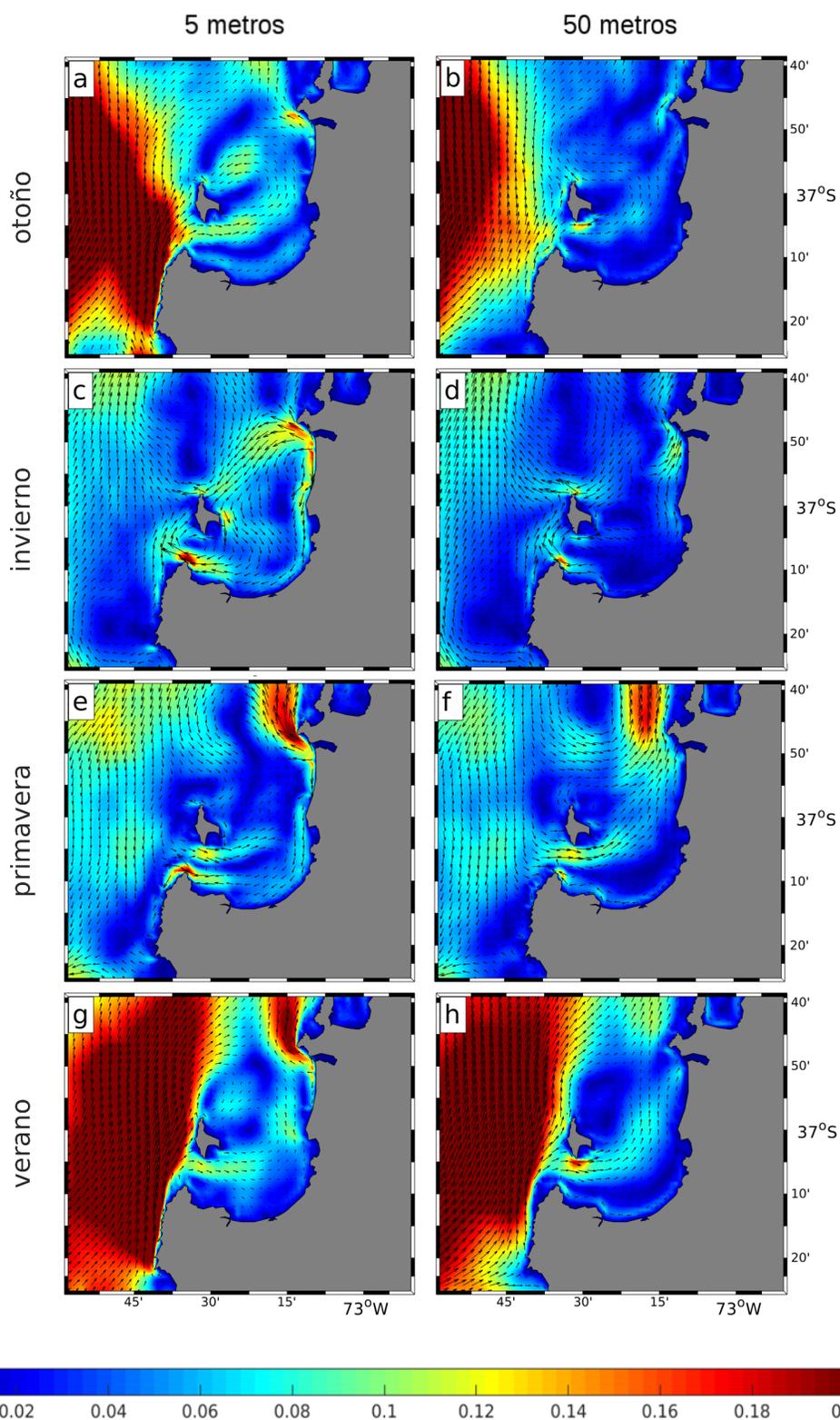


Figura 3.20: Promedios estacionales de las corrientes a 5 (a,c,e,g) y 50 metros (b,d,f,h) de profundidad para el período 4.

3.3. Impacto en el Golfo de Arauco

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de emisión de contaminantes en el GA. Estos resultados fueron analizados de forma separada de acuerdo al comportamiento de las partículas simuladas. Todas aquellas partículas que se mantuvieron circulando en el sistema fueron utilizadas para analizar las trayectorias de los contaminantes al interior del GA. En cambio, todas aquellas partículas que entraron en contacto con el límite terrestre del modelo hidrodinámico (*beaching*) fueron utilizados para analizar el impacto en la costa del sistema.

3.3.1. Tiempos de circulación de las partículas al interior de Golfo de Arauco

Las partículas liberadas al interior del GA tendieron a llegar más a la costa que a salir por sus conexiones al océano. Un 65.2% de las partículas liberadas a lo largo de la simulación terminaron impactando la costa, versus un 34.2% que lograron cruzar alguno de los límites impuestos al sistema.

Tabla 3.4: *Tiempos de circulación de partículas al interior del golfo de acuerdo a diferencias de densidad (d1: 0.8 gr/cm³, d2: 1.725 gr/cm³, d3: 2.65 gr/cm³), emisario por el cual son liberadas (E1: Coronel Norte, E2: Coronel Sur, E3: Lota, E4: San Pedro) y por período de estudio (P1: Período 1, P2: Período 2, P3: Período 3, P4: Período 4). Los valores corresponden a la separación entre el porcentaje de partículas que se retiró del sistema por las bocas (out) y las que colisionaron con la costa (bch).*

Emisario	Período de estudio	Densidad
E1: 12,5 días out (42,1 %) 12,1 días bch (57,3 %)	P1: 14,6 días out (33,3 %) 14,6 días bch (66,6 %)	D1: 11.9 días out (38.41 %) 11.9 días bch (61.6 %)
E2: 11,5 días out (23,8 %) 11,5 días bch (75,7 %)	P2: 9,6 días out (34,8 %) 9,6 días bch (63,9 %)	D2: 12.1 días out (32.1 %) 11.9 días bch (67.1 %)
E3: 14,3 días out (33,04 %) 14,2 días bch (66 %)	P3: 12 días out (33,3 %) 11,4 días bch (66,3 %)	D3: 12.1 días out (32.1 %) 11.9 días bch (67.1 %)
E4: 9,96 días out (37,9 %) 9,9 días bch (62 %)	P4: 11,9 días out (35,6 %) 12 días bch (64,2 %)	—————

Sin embargo, el tiempo necesario para llegar a una de estas zonas es prácticamente

el mismo, con 12 días para salir del sistema y 11,9 días para llegar a la costa. Esta distribución de la proporción de partículas y tiempos de permanencia o salida del sistema se conserva de forma bastante similar cuando las partículas son agrupadas en función al año de estudio, al emisario o por densidad de partícula (Tabla 3.4).

3.3.2. Trayectorias y zonas de concentración dentro del Golfo de Arauco

La figura 3.21 muestra el promedio diario de concentración de partículas ubicadas sobre los 20 metros de profundidad para cada estación (filas) pertenecientes a cada período de estudio (columnas). La figura 3.22 entrega la misma información, pero para las partículas que circulan bajo los 40 metros. Se obtuvieron las mismas imágenes para las profundidades entre 20 y 40 metros. Sin embargo, sólo se advirtió presencia de partículas en los puntos de emisión. Esto indicó que las partículas no se localizan en esta profundidad bajo ningún escenario de emisión estudiado.

Al estudiar y contrastar estas imágenes, se percibió un mayor impacto en las capas más profundas del GA (bajo 40 metros). Esto es debido a la densidad de los elementos liberados en la simulación, donde $\frac{2}{3}$ de estas poseen una densidad mayor a la del agua en la que circulan. Las partículas de menor densidad (0.8 gr/cm^3) quedaron relegadas a las capas superficiales. Junto con lo anterior, se observó que, en general, la mayor acumulación de partículas coincide con las zonas de emisión. También se advirtió una importante residencia de partículas en la zona centro/norte del GA, en particular al noreste de ISM.

Dado que las corrientes fueron generalmente más intensas en superficie que a mayor profundidad, los tiempos de residencia de los elementos más livianos fueron menores (Tabla 3.4) y las trayectorias preferidas por estas partículas dependieron principalmente de la dirección de la corriente en el momento de emisión. Esto indicó que la escala de los procesos que dominaron la dispersión de contaminantes en las capas superiores del GA son menores a las estudiadas en este trabajo. Aun así se pudo relacionar algunos de los patrones de circulación más característicos y estables de cada estación con el comportamiento y distribución espacial de las partículas (Fig. 3.4 y 3.5). Un ejemplo de esto, es lo que se observó durante las estaciones de verano (Fig. 3.21m-p) e invierno (Fig. 3.21e-h), donde la dispersión de partículas fue menor que durante los períodos de otoño (Fig. 3.21a-d) y primavera (Fig. 3.21i-l). Esto fue

debido al cambio de patrón de circulación que experimentan estos períodos, ya que al poseer menor estabilidad incrementan las posibilidades de dispersión y residencia dentro del GA. Se observaron algunas excepciones como en el invierno del P1 (Fig. 3.21e), siendo el único que mostró un patrón de mayor dispersión. Esto se atribuyó a las corrientes de este período, las cuales presentaron anomalías positivas (Figura 3.11), que debilitaron la corriente hacia el sur esperada para estos meses, disminuyendo su estabilidad. Además durante esta estación se presentó una circulación anticiclónica en la zona central del GA (Fig. 3.17c), única para invierno en los años estudiados. Esta circulación fue considerada como el causante de una mayor residencia de partículas en la zona central del GA. En el caso contrario, el otoño del mismo período presentó corrientes muy intensas (Fig. 3.17a). Estas corrientes presentaron además, niveles de estabilidad muy altos (Figura no incluida) lo que se tradujo en una baja dispersión al interior del GA en comparación a los otros otoños.

Se comparó la ubicación de las partículas entre las estaciones de mayor estabilidad (verano e invierno) y se relacionó con la información de corriente disponibles en las figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20. Durante verano se observó una mayor residencia de partículas en la costa este y en la zona norte del GA. Por el contrario, en invierno además de la costa este, se observó mayor circulación en la zona sur del sistema. Esta diferencia se debió principalmente a la dirección de la corriente principal en cada uno de estos períodos. Durante el verano la intensa corriente zonal que ingresa por BC no permite la propagación de la contaminación hacia esta zona, limitando la distribución de la contaminación. Esta corriente que luego se vuelve meridional presenta 2 opciones a las partículas que salen de los emisarios: entrar a la zona de la cabeza del GA, la cual posee corrientes muy débiles o salir del GA a través de BG1. En invierno en cambio, las corrientes más estables se dirigieron al sur lo que limitó el paso de partículas a la zona norte del GA. Esta baja concentración de partículas al norte se puede ver claramente representada en los mapas de concentración del invierno del período 2 (Fig. 3.21f), el cual presenta una estructura de corrientes típica de invierno pero con corrientes mucho más intensas (Fig. 3.18c). Estas corrientes, generan al mismo tiempo una mayor residencia en la zona de la cabeza del GA (zonas 9, 10 y 11 de la figura 2.5), lo que además se ve traducido en un mayor impacto en la costa (Fig. 3.23).

En el fondo las diferencias estacionales fueron menos claras. Todas las estaciones de los períodos estudiados muestran altas concentraciones de partículas sobre la costa este del GA. Esto se debió a que el viento, que es uno de los principales forzantes de

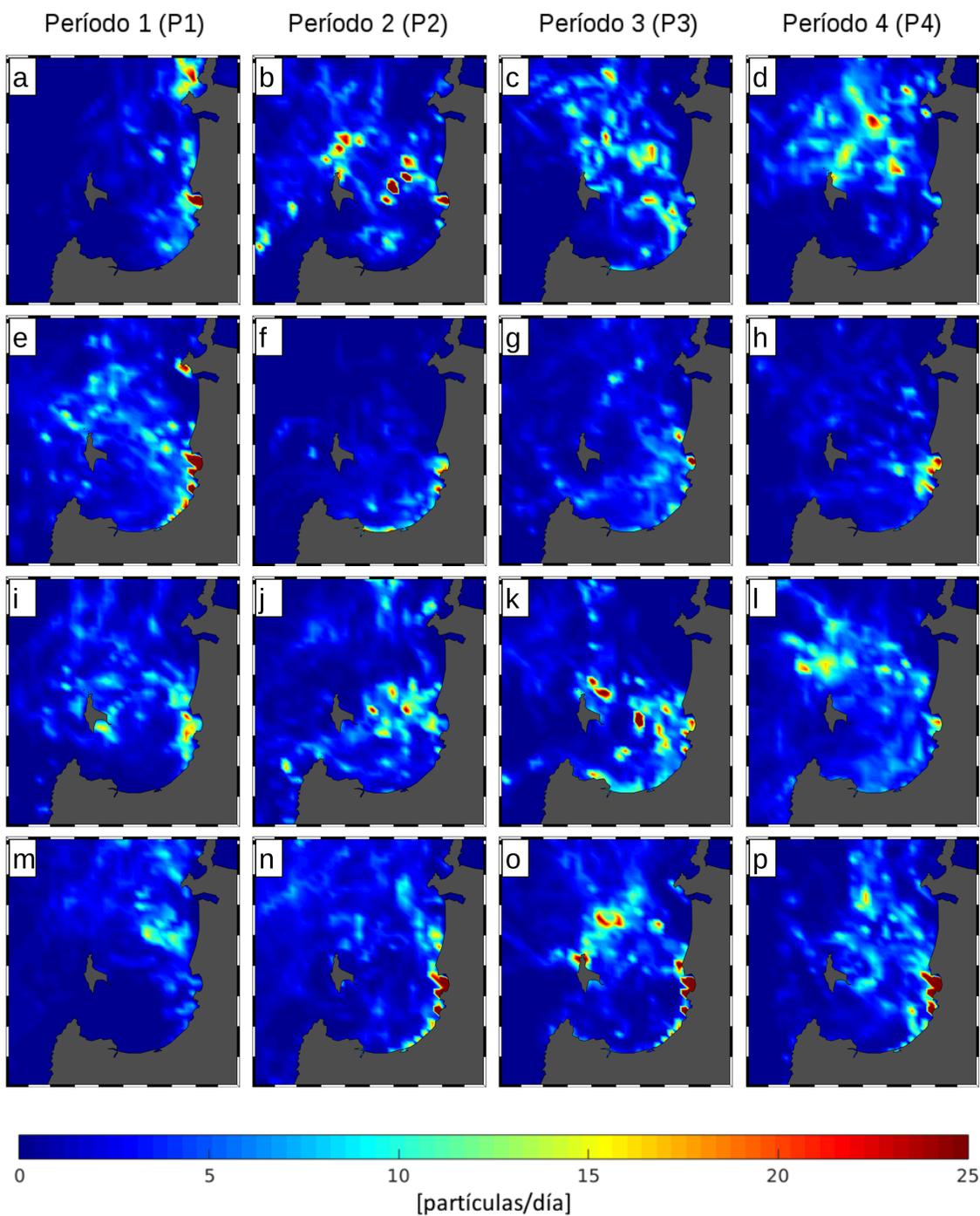


Figura 3.21: Promedio estacional de concentración de partículas entre la superficie y los 20 metros de profundidad. Cada fila representa una estación en el siguiente orden: otoño (a-d), invierno (e-h), primavera (i-l) y verano (m-p). Cada columna representa un período de estudio en el siguiente orden período 1, período 2, período 3, período 4.

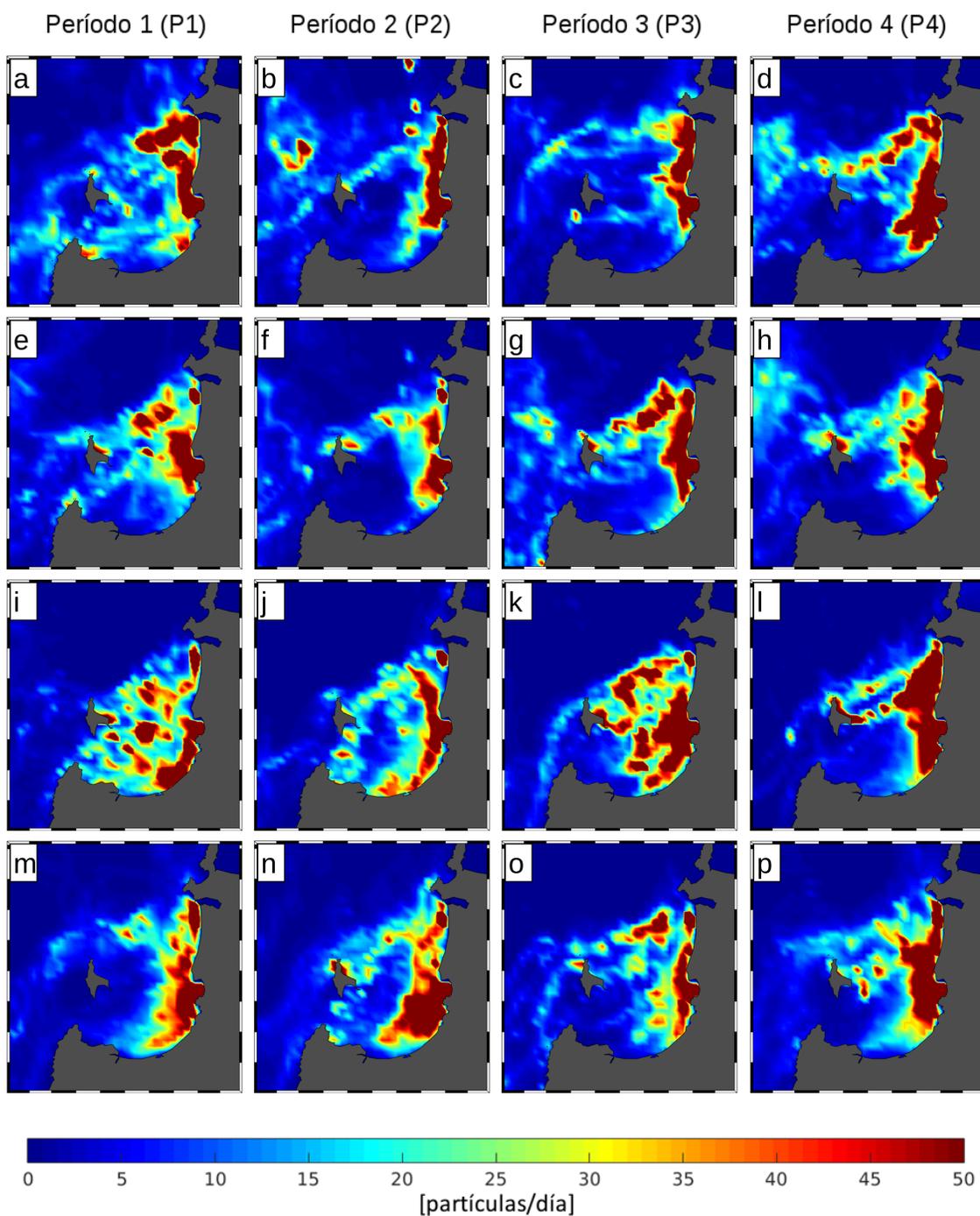


Figura 3.22: Promedio estacional de concentración de partículas entre los 40 metros de profundidad y el fondo. Cada fila representa una estación en el siguiente orden: otoño (a-d), invierno (e-h), primavera (i-l) y verano (m-p). Cada columna representa un período de estudio en el siguiente orden período 1, período 2, período 3, período 4.

las corrientes superficiales, no posee gran impacto en estas profundidades, quitando así un importante factor en la estacionalidad de las corrientes. Sumado a esto, la baja intensidad de las corrientes en esta profundidad no permitió una clara diferencia estacional entre la dispersión de partículas. Al comparar interanualmente cada estación, se observó que aquellos períodos que mostraron promedios muy bajos de corrientes poseen mayor dispersión de partículas, independiente de la dirección de las corrientes. Esto fue particularmente notorio durante primavera del período 1 (Fig. 3.17h) y del período 3 (Fig. 3.17h), así como el invierno del período 1 (Fig. 3.17f) y del período 4 (Fig. 3.20f).

A pesar de que la zona NE de la ISM posee impacto durante todo el año, las corrientes que generan este impacto son diferentes. Durante verano la residencia en la zona se debe a la formación de un dipolo ciclónico que se genera como resultado de la separación de la corriente costera al encontrarse con la ISM. Durante invierno, la residencia se debe a una corriente con dirección a la ISM originada en la desembocadura del RBB. Durante invierno se observó una corriente hacia el norte no presente en superficie. Esta forzó la circulación de partículas al norte, limitando su impacto en la zona sur. Por el contrario, durante verano y algunos períodos en primavera se observó una corriente que rodea la costa sur del GA. Esta corriente ayudó a la propagación de contaminantes a lo largo de la costa sur del GA. Sin embargo, no consiguió eliminar las partículas a través de BC. Esto se debe a la poca profundidad de BC, la baja intensidad de la corriente o una combinación de ambas.

3.3.3. Impacto en la costa

En la figura 3.23 se presenta el promedio de partículas que llegó a cada una de las 19 zonas en las que fue separada la costa del GA (Fig. 2.5). La figura 3.24 muestra esta información pero de forma promediada para cada estación. A partir de estas imágenes se determinó que las zonas con mayor impacto fueron San Pedro 1 (zona 2), Coronel Norte (zona 5), Coronel Sur (zona 6) y Lota (zona 7), las cuales corresponden a la zona de emisión. En particular, las zonas 6 y 7 recibieron altos niveles de partículas de forma continua a lo largo del período de estudio (tasa de impacto I/V de 1,2 y 0,9 respectivamente). Junto a lo anterior se observó una variabilidad temporal en algunas de las zonas. Por ejemplo, las zonas de Colcura (8), Laraquete (9) y Arauco (10 y 11), presentaron mayor impacto durante el período de invierno y primavera que durante verano y otoño (tasa de impacto I/V de 1,9, 2 y 4,9 res-

pectivamente). Al contrario, la zona de la desembocadura de RBB (1) mostró mayor impacto durante otoño. Las zonas al norte y al este de ISM (17, 18 y 19) exhibieron un impacto durante todo el ciclo anual. Sin embargo, también presentaron una variabilidad estacional, donde el impacto fue mayor durante invierno y primavera, superándolo a más del doble durante estas estaciones (tasa de impacto I/V, 2.3, 2.1, 5.1). Esta variabilidad interanual en la distribución de contaminación coincidió con la dirección de las corrientes estudiadas para cada estación.

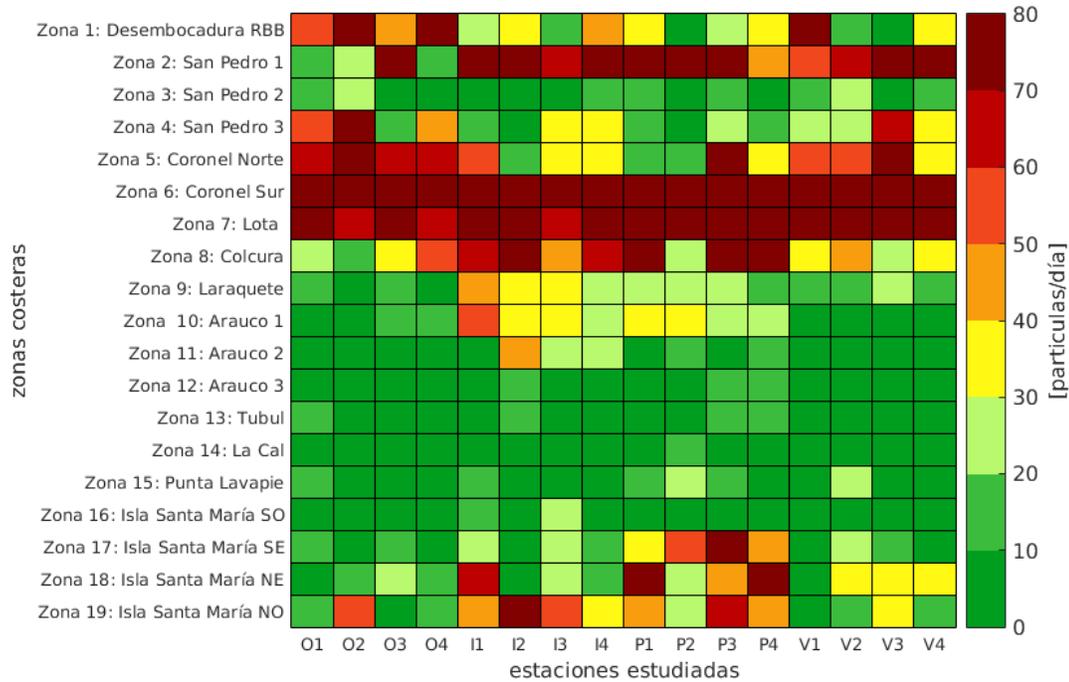


Figura 3.23: Promedio diario de llegada de partículas a cada una de las zonas estudiadas (eje y), para cada uno de las estaciones y períodos analizados (eje x; O:otoño, I:Invierno, P:Primavera, V:Verano. Referencia geográfica de las zonas en la figura 2.5)

Al estudiar el origen y distribución de los contaminantes que afectaron estas zonas (Tabla 3.4), se puede apreciar que la zona norte del área de estudio (zona 1 y 2) recibió principalmente las descargas del emisario San Pedro (E4). En la zona 1, un 69.5% de las partículas correspondieron a liberaciones de este emisario y este valor asciende a 77.2% en la zona 2. Al analizar estos impactos se determinó que la zona 2 recibió principalmente partículas de mayor densidad. Al contrario la zona 1 mostró un equilibrio en la distribución de densidad de las partículas recibidas. Este impacto de elementos más pesados en la costa, también se observó en la zona 4, incluso cuando esta zona es principalmente receptora de los residuos liberados por el emisor ubicado en Coronel Norte (E1). La zona 5, 6 y 7 las cuales corresponden a las más impactadas

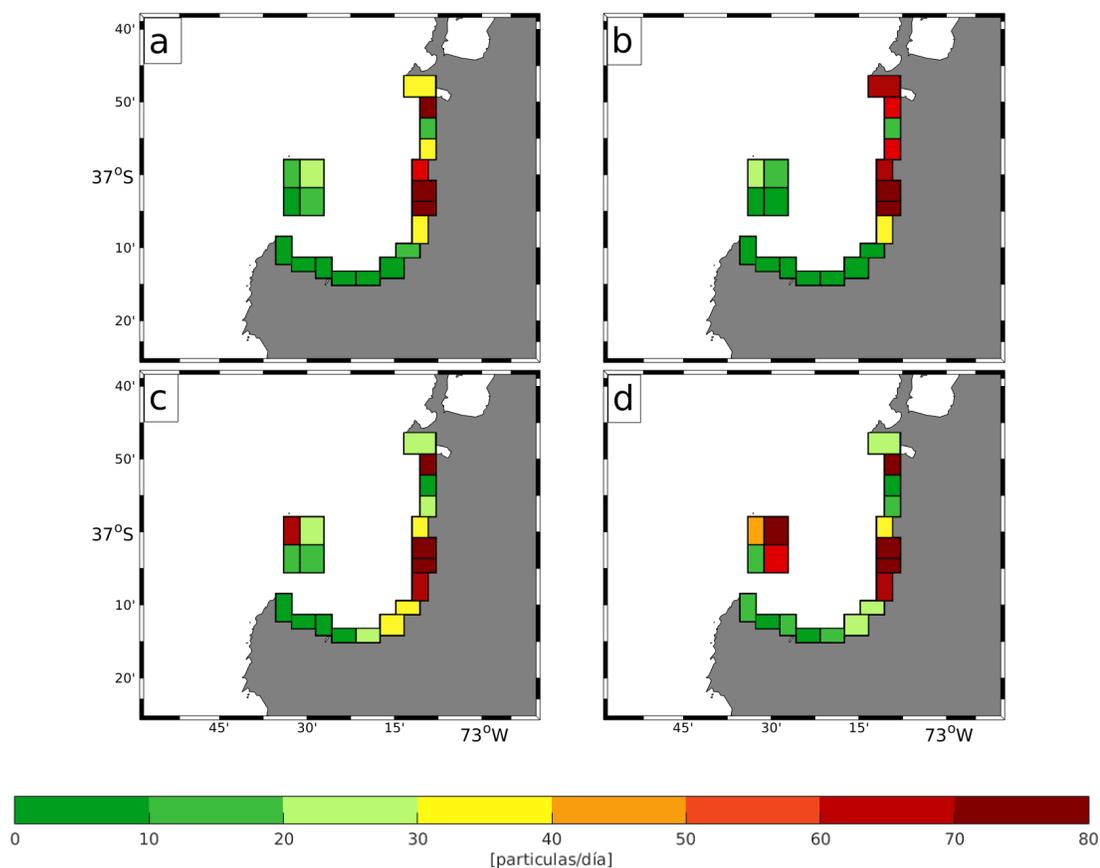


Figura 3.24: Promedio estacional del impacto en la zona costera para a) verano, b) otoño, c) invierno, d) primavera. La barra de colores representa el número de partículas que llegan al día durante las estaciones estudiadas.

del sistema, presentaron el mayor impacto proveniente de los emisores al interior de cada zona. Esto indica que gran parte de las partículas liberadas tienden a quedarse en la línea de costa de su región de emisión o en zonas aledañas. La principal fuente de emisión de las zonas en la cabeza del GA provienen del E3, superando el 50% en las zonas 8 y 9 y llegando a los 46.8% en la zona 10. A medida que las zonas se alejan de la fuente, el impacto se tornó más homogéneo en relación a los emisarios, pero se siguió percibiendo una diferencia entre las densidades. En las zonas 11, 12 y 13 las partículas que llegaron tienden a ser las de baja densidad. Finalmente en PL (zona 15) e ISM (zona 16, 17, 18 y 19) el impacto recibido es homogéneo entre densidades y emisarios.

Tabla 3.5: Descomposición del tipo de partículas que llega a cada una de las zonas costeras (determinada en la figura 2.5), de acuerdo al emisario de origen (E1: Coronel Norte, E2: Coronel Sur, E3: Lota, E4: San Pedro) y de acuerdo a la densidad de las partículas (d1: 0.8 gr/cm^3 , d2: 1.725 gr/cm^3 , d3: 2.65 gr/cm^3). Los valores se encuentran en porcentaje con respecto al total de partículas que llegan a cada zona.

	E1			E2			E3			E4		
	d1	d2	d3									
z1	3,36	5,77	5,6	1,63	3,34	3,43	2,27	2,47	2,6	21,56	24,22	23,75
z2	0,04	4,84	4,86	0,05	2,98	3,04	0,05	3,37	3,31	0,23	38,65	38,58
z3	6,39	7,86	7,92	2,2	6,61	7,03	1,43	5,92	6	4,44	22,25	21,94
z4	5,39	23,34	23,02	1,43	7,56	7,23	1,27	7,54	7,58	4,24	5,56	5,83
z5	15,81	19,17	19,32	2,45	9,2	9,18	1,87	8,92	8,83	1,78	1,75	1,73
z6	3,46	3,98	3,89	28,31	20,48	20,63	6,54	5,85	5,75	0,72	0,19	0,19
z7	6,17	4,59	4,63	12,16	18,1	17,98	5,55	14,12	14,28	1,82	0,31	0,29
z8	8,29	2,80	2,89	6,85	6,46	6,42	33,29	14,19	14,22	4,13	0,27	0,2
z9	13,6	2,24	2,17	9,19	4,55	4,61	27,26	13,17	13,1	9,83	0,12	0,16
z10	20,28	2	1,99	9,78	3,39	3,57	27,72	9,4	9,68	11,87	0,17	0,15
z11	26,81	1,22	1,35	7,65	2,15	2,05	18,1	7,37	7,12	25,87	0,16	0,15
z12	24,08	2,19	1,83	10,67	2,62	2,63	21,58	4,31	3,89	25,72	0,28	0,21
z13	22,18	4,42	3,8	7,31	4,87	4,85	16,28	9,4	10,03	13,55	1,59	1,72
z14	12,09	5,43	4,51	7,81	6,41	7,42	8,22	13,87	13,63	18,55	1,07	0,97
z15	9,18	7,27	7,41	11,77	7,18	6,77	7,06	11,96	12,08	11,41	3,96	3,96
z16	9,27	9,95	9,59	9,26	5,34	5,45	7,07	9,94	10,54	10,21	6,63	6,76
z17	9,43	10,14	10,37	5,85	7,36	7,63	8,62	9,78	9,7	7,99	6,43	6,7
z18	2,34	14,88	14,9	2,46	8,78	8,87	3,02	11,74	12,03	4,9	8,14	7,94
z19	6,12	13,26	12,88	3,78	7,16	7	4,17	9,83	9,94	6,27	9,85	9,75

Capítulo 4

Discusión

4.1. Modelación de la circulación del Golfo de Arauco y simulaciones hidrodinámicas

En este estudio se realizó un análisis de los patrones de corrientes marinas a partir de simulaciones realizadas con el modelo hidrodinámico ROMS (Regional Ocean Modeling System, Shchepetkin y McWilliams, 2005). Estas simulaciones poseen una resolución espacial de 1.3 kilómetros y temporal de 6 horas (Parada et al., 2013). Esta resolución espacial permite resolver procesos oceanográficos de mesoescala hasta submesoescala. Sin embargo, puede presentar limitaciones en la representación de procesos oceanográficos de escalas más pequeñas, los que podrían ser determinantes al momento de estudiar la dispersión de contaminantes a la escala del GA. Algunos ejemplos son el proceso de brisa marina, que corresponde a un régimen diario de corrientes perpendicular a la costa (Sobarzo y Djurfeldt, 2004; Valle-Levinson et al., 2003) o la variabilidad espacial presentada por las características hidrográficas al interior de la zona estudiada (Faundez-Baez et al., 2001; Sobarzo et al., 1993). Una solución para identificar falencias en el modelo sería la validación de este a escala local. A pesar de que se han realizado mediciones de corrientes, salinidad y temperatura en algunos puntos del GA (Djurfeldt, 1989; Faundez-Baez et al., 2001; Valle-Levinson et al., 2003), estos no estuvieron disponibles durante el desarrollo de esta tesis, por lo que no se pudo realizar una comparación cuantitativa con lo presentado en el modelo. Sin embargo, existe una validación regional que confirma la representación de las estructuras de mesoescala que dominan los procesos estacionales al interior del

GA (Parada et al., 2013). Por esta razón todos los análisis de patrones de circulación realizados en este trabajo son a la escala del GA y particularmente a nivel estacional.

La comparación de los resultados obtenidos del modelo hidrodinámico con literatura muestra una coincidencia de la circulación descrita para la zona de estudio. Algunos rasgos capturados por el modelo fueron la estacionalidad en las corrientes del GA, donde las corrientes meridionales observadas para el período de verano (Fig. 3.7a) coinciden con lo descrito en Leth y Shaffer (2001). En este estudio de simulación se muestra un flujo dominante en superficie hacia el ecuador durante los períodos de surgencia (finales de otoño, verano y principio de primavera). Leth y Shaffer (2001) también menciona que la circulación se modifica con vientos provenientes del norte, los que ocurren principalmente durante invierno (Fig. 3.12), dando origen a una corriente hacia el polo más lenta en casi toda la columna de agua. Este comportamiento se observó claramente en las corrientes estudiadas a lo largo de la BG1 (Fig. 3.7). Por otra parte y a pesar de la baja variabilidad espacial que presenta la temperatura y salinidad en este estudio, sí se observaron las variaciones temporales de escalas estacionales en los patrones hidrográficos al interior del GA, en particular la estacionalidad de la estratificación. El forzante, en este caso es la variación del caudal del RBB con el que se fuerza el modelo ingresando mayores cantidades de agua dulce al sistema durante invierno (Faundez-Baez et al., 2001).

4.2. Modelo conceptual de corrientes al interior del Golfo de Arauco

A partir de los resultados obtenidos se propone a continuación un modelo conceptual de la dinámica de las corrientes presentes en el GA a lo largo de un año climatológico. En este modelo se caracterizan los patrones de circulación al interior del Golfo observados en superficie (5 metros) y profundidad (50 metros). Se indican las dos estaciones contrastantes junto a las dos estaciones de transición entre ellas.

En verano (Fig. 4.1a) las corrientes oceánicas presentan una dirección predominantemente hacia el norte. Esta corriente ingresa al golfo por medio de la BC y se retira a través de la zona oriental de la BG. Al noreste de la isla se genera una circulación anticiclónica y una ciclónica. En profundidad (Fig. 4.1b) se observa una corriente costera hacia el sur la que potencia la formación de un ciclón en la BC. En invierno

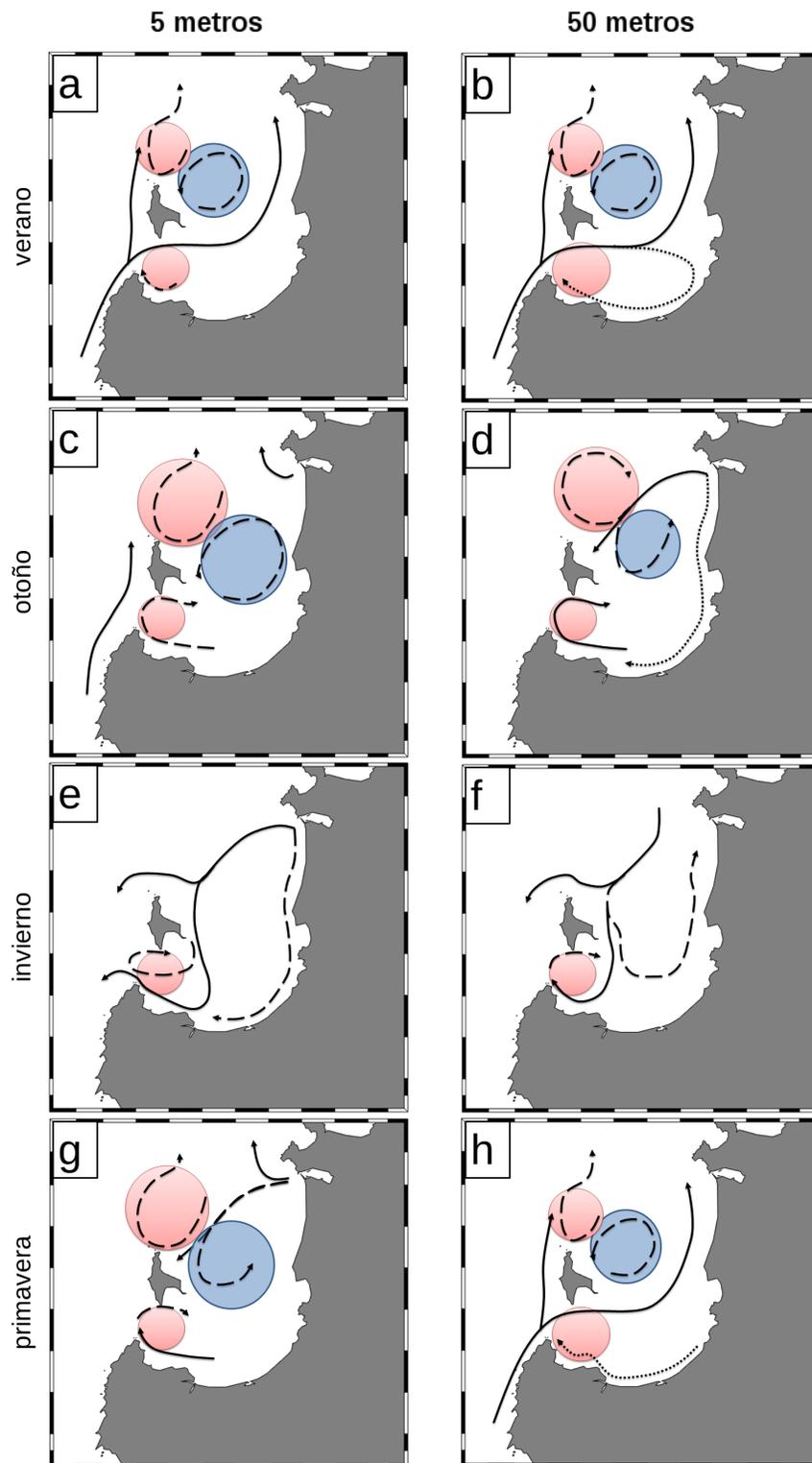


Figura 4.1: Esquema de circulación de corrientes estacionales a los 5 (a,c,e,g) y 50 (b,d,f,h) metros. Las sombras circulares bajo las corrientes indican circulaciones ciclónicas (rojo) y anticiclónicas (azul). La intensidad de las corrientes se separó entre alta (—), media (- -) y baja (···).

en cambio, se observa un patrón de corrientes en dirección SW que impactan a la ISM. Esta corriente se observa tanto en superficie (Fig. 4.1e) como en el fondo (Fig. 4.1f). En superficie la corriente rodea a la ISM y se retira a través de la BC en cambio en el fondo recircula de vuelta al interior del GA. Nuevamente se observa una circulación ciclónica en la BC. Los períodos de transición, por otra parte, muestran características de ambos regímenes. Durante otoño, el fondo (Fig. 4.1d) presenta corrientes más cercanas al comportamiento observado en invierno, con una corriente en dirección a ISM y recirculación hacia el GA. Se presenta además una circulación ciclónica al norte de ISM. En superficie (Fig. 4.1c) se observa un patrón de corrientes muy similar a lo observado en verano. Sin embargo, la intensidad de las mismas fueron mucho menores. En primavera ocurre lo contrario, donde la superficie (Fig. 4.1g) presenta una corriente hacia el sur con dirección a la ISM (corriente típica de invierno). Esta corriente da origen a un dipolo de circulación ciclónica como se observa en la figura 4.1g. En el fondo (Fig. 4.1h) se observa la misma distribución de corrientes presentada en verano con intensidades notoriamente más débiles.

El modelo conceptual propuesto en este trabajo fue contrastado con dos modelos conceptuales previamente diseñados para la misma zona (Parada et al., 2001; Valle-Levinson et al., 2003). En estos modelos se estudia la dinámica de las corrientes bajo eventos de surgencia, procesos de menor escala temporal que los estudiados en este trabajo. Sin embargo, en ambos casos se propone la dirección del viento como el principal forzante de las corrientes, por lo que es posible realizar una comparación entre estos y el modelo conceptual presentado en este trabajo. El modelo de circulación presentado en Valle-Levinson et al. (2003) indica que durante vientos de surgencia (viento sur en verano) la circulación al interior del GA genera un flujo persistente hacia el interior del GA a través la zona más profunda de BG1. Este flujo al polo es sugerido como parte de un dipolo ciclónico que causa divergencia en la zona sur (cabeza) del GA, permitiendo la surgencia de agua a la superficie. Este trabajo también menciona la salida de este flujo por medio de la zona este de BG1 y por BC. Sin embargo, en este estudio solo se usaron mediciones a lo largo de dos transectas en las bocas y un punto al este de PL. Al comparar este modelo con la circulación del modelo conceptual presentado en este trabajo durante los períodos de viento sur, podemos encontrar similitud en las zonas donde efectivamente se contaba con datos de campo. Como la entrada de agua al golfo por la zona profunda de BG1 y una corriente al norte superficial. También coincide la descripción de la corriente en BC, donde existe un flujo con dirección al oeste. Sin embargo este flujo corresponde a la zona sur del ciclón presente en la zona. El resto de la circulación descrita por

Valle-Levinson et al. (2003) no coincide con lo mostrado en este trabajo. El modelo conceptual presentado por Parada et al. (2001) presenta un esquema de 4 etapas que cubren los períodos de intensificación y relajación de surgencia obtenidos a partir de datos de 9 correntómetros dispuestos en la zona central del GA. Para los eventos de viento norte presenta una circulación ciclónica al interior del GA. Durante períodos de viento sur, la circulación es anticiclónica. La BC no presenta relevancia en este modelo. La información presentada en Parada et al. (2001) coincide parcialmente con lo postulado en ese trabajo. Al comparar el período de verano con los períodos de surgencia activa, se observa un flujo hacia el ecuador en la parte este del GA. Sin embargo, el resto de las características presentadas no se observan. El período de invierno (donde los vientos son predominantemente hacia el sur) fue comparado con lo descrito en los períodos de relajación de surgencia. En este período, la única corriente de Parada et al. (2001) que coincide con lo descrito en esta tesis es la entrada al GA desde la zona este de BG1.

Las limitaciones que presenta la modelación hidrodinámica mencionadas anteriormente pueden generar algunas desventajas sobre el modelo conceptual presentado en este trabajo. Sin embargo, el uso de simulaciones también presenta ventajas ya que usualmente la densidad de información, tanto espacial como temporal, disponible para la realización de estos modelos es mayor que la densidad de datos de campo disponibles. Permitiendo así tener un conocimiento general de toda la zona estudiada. Por esta razón, generar un modelo conceptual que se origine a partir de una combinación de datos de campo y simulaciones hidrodinámicas sería ideal para mejorar el entendimiento de las dinámicas oceanográficas de la zona del GA y complementar el modelo conceptual presentado.

4.3. Modelo de dispersión lagrangiano

El uso de MDL para determinar las trayectorias y zonas de acumulación de los contaminantes en los océanos ha visto un aumento durante los últimos años (Delpeche-Ellmann y Soomere, 2013; Doglioli et al., 2004; Guo y Wang, 2009; Lebreton et al., 2012; Schroeder et al., 2012). Esto se debe en gran medida a la plasticidad que presentan los modelos para representar diferentes contaminantes. A pesar de esto, la cantidad de trabajos que aplican estas metodologías a las costas de Chile es muy bajo (Marín et al., 2013) y actualmente no existen para las costas del GA. El segui-

miento de las trayectorias de dispersión de 4 emisarios submarinos en el GA permitió conocer el impacto de estos a lo largo de distintos años y estaciones del año. La comparación de las simulaciones permitió relacionar el efecto estacional e interanual en la dispersión de contaminantes sobre la zona costera del GA e interior de éste.

Dada la reducida información asociada a las fuentes contaminantes de estos emisarios no se caracterizó en forma explícita el comportamiento de un contaminante en particular, solo fueron configuradas propiedades simplificadas de densidad para evaluar el alcance y dominio espacial del impacto de los contaminantes simulados.

Esto implica que las propiedades de las partículas simuladas fueron bastante generales, pero permitieron simular patrones de dispersión diferenciales entre contaminantes simulados, su residencia, y su pérdida desde el interior del GA. En estudios futuros, estas simulaciones podrían ser mejoradas por medio de una caracterización específica de los contaminantes, ya sea por la simulación de procesos biogeoquímicos que experimentan las partículas o por sus interacciones con el medio.

Por otro lado, la interacción de las partículas con la costa (una interacción simple donde se detienen al contacto con la misma, *beaching*) podría introducir una subestimación del número de partículas que circulan al interior del sistema. Esto se fundamenta en que algunos contaminantes pueden volver a ingresar a la costa bajo ciertos escenarios (variación en el nivel del mar debido a la marea, cambios en la dirección del viento, interacción con la biota). En estos casos, agregar un tiempo de residencia de las partículas en la costa para luego ingresarlas al sistema de estudio podría ser una opción para mejorar la representación de los contaminantes y su interacción con la costa (Liubartseva et al., 2016). Sin embargo, dada la poca información disponible en relación a las propiedades de los contaminantes asociados a los emisarios submarinos del GA, una aproximación simple en relación a las propiedades de éstos y su interacción con la costa parece más robusta en esta etapa.

La configuración de las simulaciones de los contaminantes emitidos por los emisarios submarinos en el GA fueron forzados por promedios diarios de corrientes generados por una configuración del modelo anidado de ROMS para el GA. La residencia y dispersión fuera del GA ocurre en escala de 2-3 semanas. Sin embargo, en este estudio la escala de interés está relacionada con el efecto acumulado de estos en la escala estacional, escala frecuente de interés en otros estudios (Kako et al., 2011; Lebreton et al., 2012; Liubartseva et al., 2016; Yoon et al., 2010). Estos trabajos están enfocados en aquellos contaminantes que presentan un impacto en el sistema

acuático a largo plazo (emisarios submarinos, plásticos). Los contaminantes que afectan el ambiente marino en cortos períodos de tiempo (como el caso de derrames de petróleo) deben ser analizados con modelos hidrodinámicos que posean mejor resolución espacial y representen de mejor forma las estructuras y patrones de circulación dominantes en estas escalas (De Dominicis et al., 2013; Guo y Wang, 2009; Mariano et al., 2011)

4.4. Impacto en la costa

La metodología desarrollada en este trabajo permite identificar la ubicación del impacto que tienen los contaminantes sobre el borde costero asociados a los emisarios domésticos dispuestos en la zona del GA. En la zona existe una serie de otros emisarios, los cuales liberan aguas residuales de procesos industriales. Por lo que el impacto observado en la costa puede presentar un aumento al combinar la información presentada en este trabajo con futuras simulaciones que consideren dichos emisarios. Por otra parte el uso ecosistémico de las zonas afectadas puede presentar variaciones determinantes en el impacto de la zona costera. Contaminar un área altamente industrializada no presentará el mismo costo ambiental que contaminar una zona de importancia turística o alta producción biológica. Al comparar los resultados obtenidos en la figura 3.24 con los usos ecosistémicos que posee el borde costero del GA (Fig. 4.2) se observa que las zonas con mayor impacto a lo largo del año (costa este del GA) corresponden a las zonas con mayor número de usos, entre los que destacan el turismo y la conservación de patrimonio cultural (CRUBC, 2012).

Se espera que el material presentado en este trabajo contribuir en el estudio de la dispersión de contaminantes en el GA, al entregar una evaluación cuantitativa de los impactos remotos que pueden producir los emisarios submarinos que se integren al borde costero. Incluso si el método y los resultados presentados en este trabajo no son lo suficientemente detallados como para caracterizar exactamente los impactos sobre las diferentes zonas costeras, estas entregan una primera aproximación de cuáles son las zonas más expuestas y el alcance que tienen los diferentes emisarios submarinos al interior del GA bajo diferentes escenarios oceanográficos.

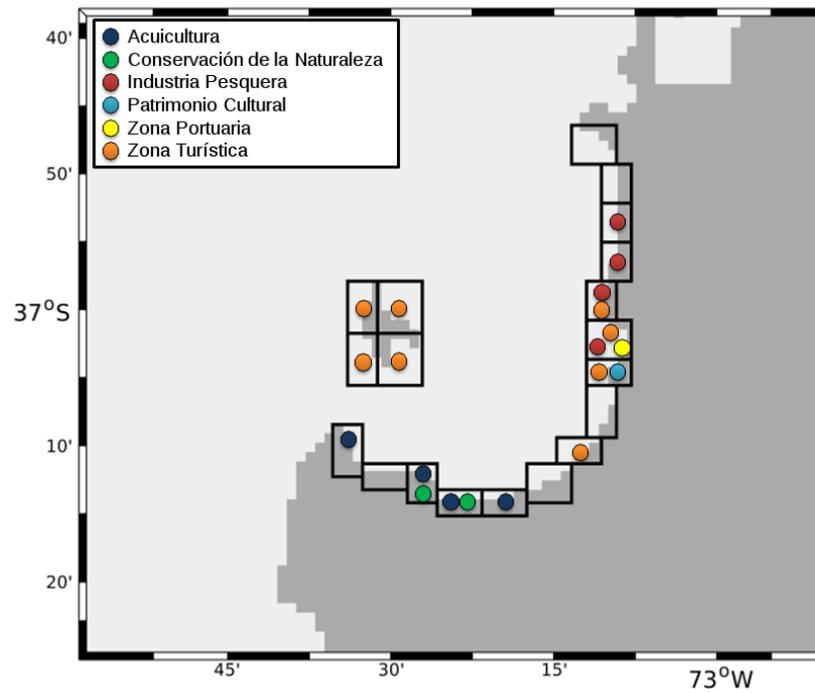


Figura 4.2: Mapa de la zona de estudio ubicada en el Golfo de Arauco. Junto al uso ecosistémico que presentan las diferentes zonas.

Capítulo 5

Conclusión

En el presente trabajo se realizó una descripción de la dinámica de circulación del GA a partir de simulaciones realizadas con un modelo hidrodinámico. A partir de esta información se desarrolló una serie de experimentos por medio de un modelo de dispersión lagrangiano lo cual permitió el estudio de la dispersión de contaminantes al interior de este sistema y su relación con las estructuras oceanográficas presentes en las simulaciones.

El estudio de la oceanografía del sistema se realizó a partir de simulaciones realizadas en ROMS, las cuales cubren el período 1996-2011. Del análisis realizado se concluye la presencia de un ciclo anual caracterizado por dos estaciones con propiedades oceanográficas contrastantes (verano e invierno). Además se observaron períodos de transición con características oceanográficas menos marcadas (primavera y otoño). En general las estaciones estables presentan un comportamiento de una capa, con dirección predominantemente al norte en verano y sur en invierno, a diferencia de los períodos de transición que mantienen un comportamiento de doble capa. Se generó un modelo conceptual donde se señalan las estructuras oceanográficas más importantes de cada estación.

A partir del estudio de circulación se seleccionaron 4 períodos en los que se observan anomalías en la intensidad de corrientes para diferentes estaciones. Por medio de un modelo de dispersión lagrangiano acoplado al modelo hidrodinámico previamente mencionado se realizaron simulaciones de liberación de contaminantes sobre los períodos seleccionados. Estas liberaciones de partículas se realizaron a partir de los 4 puntos donde se ubican los emisarios submarinos domésticos del GA. Estas simulacio-

nes fueron utilizadas para evaluar la relación entre la dispersión de los contaminantes y las anomalías observadas en cada período seleccionado.

La mayoría de los contaminantes liberados desde los emisarios no salen del golfo, sino que solo dejan de circular, asentándose en la zona costera del sistema. Esto se concluye a partir del porcentaje de partículas que terminan en la costa (65.2%), en comparación al de partículas que se retiran del sistema por medio de las bocas (34.2%).

Las zonas con mayor impacto corresponden a las zonas de emisión (San Pedro 1, Coronel Norte, Coronel Sur y Lota). Este impacto es independiente de la estación o período de liberación de partículas, por lo que afecta durante todo el año.

Con respecto a la profundidad de circulación de las partículas, aquellas con densidades de 0.8 gr/cm^3 se movieron sobre los 20 metros de profundidad y aquellas con densidades mayores (1.725 y 2.65 gr/cm^3) circularon en la capa bajo los 40 metros. Esta capa concentra más partículas que la superficie (doble), mientras que la capa entre 20 y 40 metros de profundidad solo mostró presencia de partículas al momento de la emisión.

En superficie las trayectorias de circulación de partículas al interior del golfo mostraron alta variabilidad estacional. En verano, las zonas más afectadas por la circulación de corrientes son la costa este del GA, y la zona NE del ISM. En invierno, en cambio, las corrientes transportan los contaminantes hacia el sur, generando mayor impacto en la costa sur del GA. La alta concentración de partículas observada durante estas estaciones estables presentó poca dispersión hacia el interior del golfo debido a que la mayoría de la partículas simuladas quedan atrapadas en la costa (hacen *beaching*). Por el contrario, las estaciones de transición mostraron mayor dispersión hacia la zona central del sistema estudiado. Esto se relacionó con la estabilidad de las corrientes, las cuales son mayores durante verano e invierno que durante las estaciones de transición, particularmente en superficie. Este mayor cambio de dirección de corrientes durante otoño y primavera permite una mayor residencia de las partículas al interior del GA.

En el fondo, la trayectoria de partículas al interior del Golfo presenta menor variabilidad estacional, principalmente por la disminución en la intensidad de corrientes presentes y al poco impacto que tiene el forzante de viento en esta profundidad, principal impulsor de la variabilidad estacional. En este caso, los patrones de dispersión de partículas no muestra un patrón estacional claro. Sin embargo, se determinó que

la intensidad de las corrientes es un factor determinante en la dispersión de partículas y en la zonas costeras que estas impactan.

Del análisis de descomposición del origen de las partículas que llegan a cada una de las zonas costeras y la densidad que estas poseen, se confirmó que la zona de emisión es la principal receptora de partículas liberadas. Aún así, se presentó impacto en zonas lejanas de las zonas de emisión como es el caso de la zona norte y este de la ISM o la zona sur del GA (Colcura, Laraquete, Arauco 1 y Arauco 2).

Este estudio contribuye al entendimiento de la dinámica costera del GA, zona que presenta un alta importancia tanto económica como ecológica. Los resultados de este estudio asociados a los patrones de circulación estacional pueden ser útiles y aplicables a otros problemas de contaminación (contaminación por plásticos), sobretodo en los planes de manejo y toma de decisiones en torno al vertimiento de contaminantes. La aproximación metodológica (modelo lagrangiano acoplado a un modelo hidrodinámico) utilizada en este estudio puede ser aplicable a otras zonas de estudio impactadas por contaminantes. Finalmente, este tipo de estudio puede permitir una mejora en la planificación de los emisarios submarinos de tal manera de hacer más eficiente su eliminación y reducir el impacto en zonas costeras, específicamente susceptibles y/o vulnerables al impacto ambiental.

Bibliografía

- Aguirre-Martínez , G., Rudolph , A., Ahumada , R., Loyola , R., y Medina , V. Toxicidad no específica en sedimentos portuarios, una aproximación al contenido de contaminantes críticos. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(3):725–735, 2009.
- Ahumada , R. Bahías: Áreas de uso múltiple un enfoque holístico del problema de la contaminación. *Ciencia y Tecnología del Mar, Número Especial*, págs. 59–68, 1995.
- Ahumada , R., Rudolph , A., y Contreras , S. Evaluation of coastal waters receiving fish processing waste: Lota bay as a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 90(1):89–99, 2004.
- Andrello , M., Mouillot , D., Beuvier , J., Albouy , C., Thuiller , W., y Manel , S. Low connectivity between Mediterranean marine protected areas: A biophysical modeling approach for the dusky grouper *Epinephelus marginatus*. *Plos One*, 8(7):e68564, 2013.
- Arcos , D., Nuñez , S., Castro , L., y Navarro , N. Variabilidad vertical de clorofila a en un área de surgencia frente a Chile central. *Investigación Pesquera (Chile)*, 34:47–55, 1987.
- Bahadur , R., Amstutz , D., y Samuels , W. Water contamination modeling-a review of the state of the science. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(2):142, 2013.
- Blumberg , A. y Mellor , G. L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-dimensional coastal ocean models*, págs. 1–16, 1987.
- Brochier , T., Lett , C., Tam , J., Fréon , P., Colas , F., y Ayón , P. An individual-

- based model study of anchovy early life history in the northern Humboldt Current System. *Progress in Oceanography*, 79(2):313–325, 2008.
- Carifeño , E. Educación ambiental, Región del Bío Bío. Inf. téc., Sistema Nacional de Información Ambiental, 2011.
- Casado-Martinez , M., Forja , J., y DelValls , T. Direct comparison of amphipod sensitivities to dredged sediments from Spanish ports. *Chemosphere*, 68(4):677–685, 2007.
- Chen , H. A mathematical model for water quality analysis. En *Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering*, págs. 350–357. ASCE, 1978.
- CRUBC . Memoria explicativa. zonificación de uso del borde costero, región del Bío Bío. Inf. téc., Comisión regional de uso de borde costero. Gobierno regional del Bío-Bío, 2012.
- De Dominicis , M., Pinaridi , N., Zodiatis , G., y Archetti , R. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—part 2: Numerical simulations and validations. *Geoscientific Model Development*, 6(6):1871–1888, 2013.
- Debreu , L., Vouland , C., y Blayo , E. AGRIF: Adaptive Grid Refinement in Fortran. *Computers & Geosciences*, 34(1):8–13, 2008.
- Delpeche-Ellmann , N. y Soomere , T. Investigating the marine protected areas most at risk of current-driven pollution in the Gulf of Finland, the Baltic Sea, using a Lagrangian transport model. *Marine Pollution Bulletin*, 67(1):121–129, 2013.
- Djurfeldt , L. Circulation and mixing in a coastal upwelling embayment; Gulf of Arauco, Chile. *Continental Shelf Research*, 9(11):1003–1016, 1989.
- Doglioli , A., Magaldi , M., Vezzulli , L., y Tucci , S. Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (western mediterranean). *Aquaculture*, 231(1):215–235, 2004.
- Faundez-Baez , P., Morales , C., y Arcos , D. Variabilidad espacial y temporal en la hidrografía invernal del sistema de bahías frente a la VIII región (Chile centro-sur). *Revista Chilena de Historia Natural*, 74:817–831, 2001.

- Fernández , V., Dietrich , D., Haney , R., y Tintoré , J. Mesoscale, seasonal and interannual variability in the Mediterranean Sea using a numerical ocean model. *Progress in Oceanography*, 66:321–340, 2005.
- Golbeck , I., Li , X., Janssen , F., Brüning , T., Nielsen , J., Huess , V., Söderkvist , J., Büchmann , B., Siiriä , S., Vähä-Piikkiö , O., et al. Uncertainty estimation for operational ocean forecast products: A multi-model ensemble for the North Sea and the Baltic Sea. *Ocean Dynamics*, 65(12):1603–1631, 2015.
- Guo , W. y Wang , Y. A numerical oil spill model based on a hybrid method. *Marine Pollution Bulletin*, 58(5):726–734, 2009.
- Hernández , A., Cubillos , L., y Quiñones , R. Evaluación talla estructurada de los stocks de *Ensis macha* y *Tagelus dombeii* en el Golfo de Arauco, Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 46(2):157–176, 2011.
- Hidalgo-González , R. y Álvarez-Borrego , S. Estructura de la columna de agua y perfiles de biomasa fitoplanctónica en el Golfo de México. *Ciencias Marinas*, 34(2):197–212, 2008.
- Ilyina , T., Pohlmann , T., Lammel , G., y Sündermann , J. A fate and transport ocean model for persistent organic pollutants and its application to the North Sea. *Journal of Marine Systems*, 63(1):1–19, 2006.
- James , I. Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: A review. *Environmental Modelling & Software*, 17(4):363–385, 2002.
- Kako , S., Isobe , A., Magome , S., Hinata , H., Seino , S., y Kojima , A. Establishment of numerical beach-litter hindcast/forecast models: An application to Goto Islands, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2):293–302, 2011.
- Landaeta , M. y Castro , L. Spawning and larval survival of the Chilean hake *Merluccius gayi* under later summer conditions in the Gulf of Arauco, central Chile. *Fisheries Research*, 77(1):115–121, 2006.
- Large , W., McWilliams , J., y Doney , S. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*, 32(4):363–403, 1994.
- Lebreton , L., Greer , S., y Borrero , J. Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Marine Pollution Bulletin*, 64(3):653–661, 2012.

- Leonardi , M. y Tarifeño , E. Efecto de la descarga de aguas servidas por un emisario submarino en lenguados, *Paralichthys microps* (Gunter, 1881) *Paralichthys adspersus* (Steindachner 1867) en bahía Concepción, Chile: evidencias experimentales. *Revista de Biología Marina*, 31(1):23–44, 1996.
- Letelier , J., Pizarro , O., y Nuñez , S. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C12), 2009.
- Leth , O. y Shaffer , G. A numerical study of the seasonal variability in the circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C10):22229–22248, 2001.
- Lett , C., Verley , P., Mullon , C., Parada , C., Brochier , T., Penven , P., y Blanke , B. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 23(9):1210–1214, 2008.
- Liubartseva , S., Coppini , G., Lecci , R., y Creti , S. Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1):115–127, 2016.
- Lohmann , K., Putman , N., y Lohmann , C. The magnetic map of hatchling loggerhead sea turtles. *Current Opinion in Neurobiology*, 22(2):336–342, 2012.
- Marchesiello , P., McWilliams , J., y Shchepetkin , A. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 3(1):1–20, 2001.
- Mariano , A., Kourafalou , V., Srinivasan , A., Kang , H., Halliwell , G., Ryan , E., y Roffer , M. On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico oil spill. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 52(1):322–340, 2011.
- Marín , V., Tironi , A., Paredes , M., y Contreras , M. Modeling suspended solids in a Northern Chilean Patagonia glacier-fed fjord: GLOF scenarios under climate change conditions. *Ecological Modelling*, 264:7–16, 2013.
- McCready , S., Spyrikis , G., Greely , C., Birch , G., y Long , E. Toxicity of surficial sediments from Sydney Harbour and vicinity, Australia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96(1):53–83, 2004.

- Mellor , G. *Users guide for a three dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University Princeton, NJ 08544-0710, 1998.
- Mesias , J., Matano , R., y Strub , T. Dynamical analysis of the upwelling circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C3), 2003.
- Mesias , J., Matano , R., y Strub , T. A numerical study of the upwelling circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C9), 2001.
- Ospina-Álvarez , A., Palomera , I., y Parada , C. Changes in egg buoyancy during development and its effects on the vertical distribution of anchovy eggs. *Fisheries Research*, 117:86–95, 2012.
- Parada , C., Sobarzo , M., Figueroa , D., Castro , C., et al. Circulación del Golfo de Arauco en un período de transición estacional: Un nuevo enfoque. *Investigaciones Marinas*, 29(1):11–23, 2001.
- Parada , C. et al. Estimación de índices de reclutamiento basados en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile: Fase I. Inf. Téc. ID:2012-56-Dap-17, Instituto de Investigación Pesquera, 2013.
- Park , R. A., Clough , J. S., y Wellman , M. C. AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems. *Ecological Modelling*, 213(1):1–15, 2008.
- Perianez , R. Models for pollutant behavior in Spanish–Moroccan waters. *Ocean Engineering*, 38(17):2077–2088, 2011.
- Periáñez , R. Modelling the environmental behaviour of pollutants in Algeciras Bay (south Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 64(2):221–232, 2012.
- Pozo , K., Urrutia , R., Mariottini , M., Rudolph , A., Banguera , J., Pozo , K., Parra , O., y Focardi , S. Levels of persistent organic pollutants (POPs) in sediments from Lengua estuary, central Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1):338–341, 2014.
- Putman , N. y He , R. Tracking the long-distance dispersal of marine organisms: sensitivity to ocean model resolution. *Journal of the Royal Society Interface*, 10(81):20120979, 2013.

- Rudolph , A., Ahumada , R., y Pérez , C. Dissolved oxygen content as an index of water quality in San Vicente Bay, Chile (36° s). *Environmental Monitoring and Assessment*, 78(1):89–100, 2002a.
- Rudolph , A., Franco , C., Becerra , J., Barros , A., y Ahumada , R. Evaluación de materia orgánica e hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimentos superficiales, bahía Concepción-Chile. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 47(4):403–410, 2002b.
- Russell , D. *Practical wastewater treatment*. John Wiley & Sons, 2006.
- Schroeder , K., Chiggiato , J., Haza , A., Griffa , A., Özgökmen , T., Zanasca , P., Molcard , A., Borghini , M., Poulain , P., Gerin , R., et al. Targeted Lagrangian sampling of submesoscale dispersion at a coastal frontal zone. *Geophysical Research Letters*, 39(11), 2012.
- Shchepetkin , A. y McWilliams , J. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4):347–404, 2005.
- Simpson , J. y Hunter , J. Fronts in the Irish sea. *Nature*, 250(5465):404–406, 1974.
- Sobarzo , M., Figueroa , M., y Djurfeldt , L. Upwelling of subsurface water into the rim of the Biobio submarine canyon as a response to surface winds. *Continental Shelf Research*, 21(3):279–299, 2001.
- Sobarzo , M., Sansone , E., Demaio , A., Arcos , D., Salamanca , M., y Henríquez , J. Variabilidad espacio-temporal de la estructura hidrográfica de las aguas del Golfo de Arauco. *Scientific Report Series*, 4, 1993.
- Sobarzo , M. y Djurfeldt , L. Coastal upwelling process on a continental shelf limited by submarine canyons, Concepción, central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12), 2004.
- Sprovieri , M., Feo , M., Prevedello , L., Manta , D., Sammartino , S., Tamburrino , S., y Marsella , E. Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour (southern Italy). *Chemosphere*, 67(5):998–1009, 2007.
- Torrence , C. y Compo , G. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:61–78, 1998.

- Valle-Levinson , A., Atkinson , L., Figueroa , D., y Castro , L. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C2):3054, 2003.
- Wang , J., Connor , J., y Parsons , R. *Mathematical Modeling of Near Coastal Circulation*. 13. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 1975.
- Yoon , J., Kawano , S., y Igawa , S. Modeling of marine litter drift and beaching in the Japan Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 60(3):448–463, 2010.
- Zelenke , B., O'Connor , C., Barker , C., Beegle-Krause , C., y Eclipse , L. General NOAA Operational Modeling Environment (gnome) technical documentation. *NOAA Technical Memorandum NOS OR&R*, 40:105, 2012.