



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

REMOLINOS EN EL GOLFO DE ANCUD: UN ANÁLISIS NUMÉRICO

Por: Tomás Elías Valderrama Platz

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de Geofísico

Marzo 2021

Concepción, Chile

Profesor Guía: Héctor Hito Andrés Sepúlveda Allende

Co-Guía: Osvaldo Artal Arrieta

Comisión: Osvaldo Artal, Carolina Parada, Oscar Pizarro

© 2021, Tomás Elías Valderrama Platz

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

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

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a cada persona que me acompañó en el camino, desde desarme suerte hasta motivarme a seguir. Agradezco a todo aquél que se interesó en mi trabajo y me ofreció su ayuda, o me respondió algunas dudas. También agradezco a toda persona sabiendo o no que estaba en mi tesis, se interesa por mí y me ofrece su amistad. Finalmente le agradezco a la comisión, por su interés, paciencia, voluntad y acompañamiento. En especial le agradezco a Andrés y Osvaldo, quienes me motivaron semana a semana a que continúe, siempre dispuestos a ayudarme.

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de identificación y caracterización sobre un remolino oceánico generado en la zona del Golfo de Ancud, mar interior de Chiloé. Se utilizaron datos provenientes del modelo operacional sur austral (MOSA) de los años 2018 y 2019 con el objetivo de identificar y caracterizar dicha estructura oceanográfica. Se utilizó un método físico de identificación de remolinos (Okubo-Weiss). Además se calcularon gradientes de temperatura superficial del mar y vorticidad; sumado a la visualización de cortes verticales de velocidad de corrientes. Esta información permitió identificar un remolino ciclónico, centrado principalmente entre un rango de coordenadas que van desde $-76,06^{\circ}\text{E}$ hasta $-72,98^{\circ}\text{E}$ longitudinalmente y $-42,06^{\circ}\text{N}$ hasta $-42,1^{\circ}\text{N}$. Se evaluaron 742 días, de los cuales un 92.6 % presentó remolinos. Las dimensiones del remolino varían entre 10 y 40 km; donde el 83.4 % de los casos corresponde al rango entre 10 y 25 km. El fenómeno estudiado presenta una variabilidad estacional en cuanto a sus dimensiones, siendo el verano la única estación que presentó un rango modal mayor a los 15 km; concretamente entre 15 y 20 km. El objetivo de este estudio era comprobar la existencia de un remolino oceánico en la zona del golfo de Ancud, identificándolo y caracterizándolo. Al no encontrar evidencia en la literatura científica de que se haya estudiado este remolino, este trabajo busca ser una primera aproximación al estudio de un fenómeno que deberá profundizarse en aras de comprender de mejor forma el mar interior de Chiloé.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
1.1. Mar Interior de Chiloé	1
1.2. Características oceanográficas del Golfo de Ancud	3
1.3. Métodos de Detección de Remolinos	6
1.3.1. Tipo Físico	7
1.3.2. Tipo Geométrico	7
1.3.3. Híbridos	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivos	8
1.5.1. Objetivos Generales	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
2. Marco Teórico	9
2.1. Métodos de Okubo-Weiss	9
2.1.1. Críticas	10
3. Metodología	11
3.1. Modelo Numérico CROCO	11
3.2. MOSA	12
3.3. Método Detección	14
3.4. Caracterización	15
4. Resultados	16
4.1. Gradientes de temperatura	16
4.2. Vorticidad	19
4.3. Velocidades de corriente	22
4.4. Parámetro de Okubo-Weiss	24
4.5. Identificación	27
5. Discusión	34
6. Conclusión	37

7. Bibliografía	39
8. Anexo	45
8.1. Datos 2019	45

Índice de cuadros

4.5.1.Tabla con los valores del histograma de diámetros, año 2018. . . .	28
4.5.2.Tabla con los valores del histograma de diámetros, año 2019. . . .	29
4.5.3.Tabla con los valores del histograma de diámetros para el año 2018	31
4.5.4.Tabla con los valores del histograma de diámetros para el año 2019	33

Índice de figuras

1.1.1. Modelo esquemático de la circulación vertical del Mar Interior de Chiloé. Figura tomada de Sievers & Silva (2006).	2
1.2.1. Batimetría del Mar Interior de Chiloé. Figura tomada de Rodrigo (2006)	5
3.2.1. Diagrama de flujo funcionamiento MOSA-ROMS (Ruiz et al., 2021)	14
4.1.1. Gradientes de temperatura superficial durante el 1 al 6 de febrero. Ordenado desde la a) hasta la f).	17
4.1.2. Gradientes de temperatura superficial durante el 3 al 8 de agosto. Ordenado desde la a) hasta la f).	18
4.2.1. Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 1 y el 6 de febrero del 2018. Ordenado desde la a) hasta la f).	20
4.2.2. Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 3 y el 8 de agosto del 2018. Ordenado desde la a) hasta la f).	21
4.3.1. Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 1 al 6 de febrero del 2018. Ordenadas desde la a) hasta la f).	23
4.3.2. Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 3 al 8 de agosto del 2018. Ordenadas desde la a) hasta la f).	23
4.4.1. Valores diarios de OW estivales del año 2018. Correspondiente al período entre el 1 y 6 de febrero; ordenados de la a) hasta la f)	25
4.4.2. Valores diarios de OW invernales del 2018. Correspondiente al período entre el 3 y 8 de agosto; ordenados de la a) hasta la f).	26
4.5.1. Histograma de centros de remolinos detectados, en primer lugar para el año 2018 y 2019.	27
4.5.2. Histograma de diámetros para los remolinos detectados en el golfo de Ancud durante el 2018.	28
4.5.3. Histograma de diámetros para los remolinos detectados en el golfo de Ancud durante el 2019.	29
4.5.4. Histograma de mediciones de diámetros para el golfo de Ancud agrupado por estaciones meteorológicas, caso año 2018.	30
4.5.5. Histograma de mediciones de diámetros para el golfo de Ancud agrupado por estaciones meteorológicas, caso año 2019.	32
8.1.1. Gradientes de temperatura superficial durante el 1 al 6 de febrero del año 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).	46

8.1.2. Gradientes de temperatura superficial durante el 3 al 8 de agosto del año 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).	47
8.1.3. Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 1 y el 6 de febrero del 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).	48
8.1.4. Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 3 y el 8 de agosto del 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).	49
8.1.5. Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 1 al 6 de febrero del 2019. Ordenadas desde la a) hasta la f).	50
8.1.6. Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 3 al 8 de agosto del 2019. Ordenadas desde la a) hasta la f).	50
8.1.7. Valores diarios de OW estivales del año 2019. Correspondiente al período entre el 1 y 6 de febrero; ordenados de la a) hasta la f).	51
8.1.8. Valores diarios de OW invernales del 2019. Correspondiente al período entre el 3 y 8 de agosto; ordenados de la a) hasta la f).	52

Capítulo 1

Introducción

1.1. Mar Interior de Chiloé

El mar interior de Chiloé (MIC) corresponde a un sistema marino transitorio (Iriarte et al., 2010) y semicerrado que se extiende desde 41°S -45°S (Lara et al., 2016). De norte a sur está conformado por el seno Reloncaví, el golfo de Ancud y el golfo Corcovado. El MIC se conecta con aguas oceánicas mediante el canal del Chacao en la zona norte, mientras que en la zona sur lo hace a través de la boca del Guafo. El MIC posee una circulación estuarina dominada por los aportes de agua dulce, el efecto de las mareas, viento y presencia de constricciones topográficas. Puede ser esquematizado por medio de un modelo de dos capas, separadas por una pycnoclina dominada por la distribución de salinidad. Su capa superficial posee un grosor aproximado de 50 metros de profundidad, con un flujo predominante hacia el sur; mientras que la capa profunda (>50 m de profundidad) en dirección norte (Silva et al., 1995).

A pesar de que referirse a masas de agua en un sistema de cuencas con profundidades relativamente pequeñas parece incorrecto, dado el enorme impacto del agua dulce y la gran mezcla que genera la marea. Comúnmente podemos

encontrar autores que describen las propiedades de las aguas observadas en el MIC de esta forma. De esta manera se podrá categorizar según las características que presentan las masas de agua encontradas en la zona y las mezclas que surgen con el Agua Dulce (AD) presente glaciares, lluvia, aporte de ríos, escorrentía costera y pluviosidad. Usando este criterio se han logrado elaborar esquemas simplificados de circulación para el MIC. El año 2006 Silva y Sievers desarrollan un esquema de circulación para toda el sistema de fiordos y canales del mar interior chileno, distinguiéndose cuatro masas de agua en el MIC; Agua Superficial Subantártica (ASAA), Ecuatorial Subsuperficial (AESS), Superficial Subantártica Modificada (ASAAM) y Agua Estuarina (AE); estas últimas producto de la mezcla de ASAA con agua dulce (AD) (Sievers & Silva., 2006).

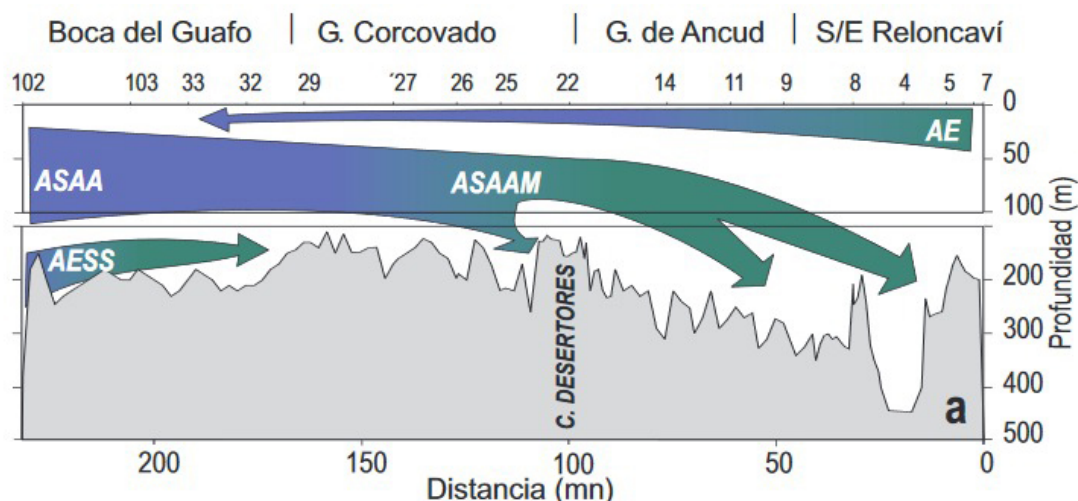


Figura 1.1.1: Modelo esquemático de la circulación vertical del Mar Interior de Chiloé. Figura tomada de Sievers & Silva (2006).

Ordenando este esquema desde la superficie hasta el fondo, podemos encontrar en los primeros 50 metros de profundidad AE, la cual circula desde el seno Reloncaví hasta la Boca del Guafo. Las AE son aquellas con salinidades menores, para éstas se propone dividirlo en tres categorías según el alcance de participación de cada masa de agua en la mezcla; AE salada: más del 66 % de agua de mar (21 a 31 psu), AE salobre: 33 % hasta 66 % de agua de mar (11 a 21 psu) y AE dulce:

menos del 33 % de agua de mar (2 a 11 psu) (Silva et al., 1998). Posteriormente, desde un rango de profundidad de 50-150 metros encontraremos ASAA, la cual entra por la Boca del Guafo, en el Golfo Corcovado se mezcla con AD llegando al Golfo de Ancud y el Seno Reloncaví como ASAAM ocupando todo el espectro de profundidades de estas cuencas. La salinidad de el ASAA corresponde a 33 psu con una temperatura entre 8 y 9 grados Celsius (Sievers et al., 2002), mientras que el ASAAM posee salinidades entre 31 y 33 psu. Finalmente, nos encontramos con la entrada de AESS por la Boca del Guafo en un rango de profundidades de 150-300 m, ésta no logra ingresar a las cuencas del norte por la batimetría de la zona. El AESS presenta una salinidad de 34,8 psu y una temperatura de 12,5°C.

1.2. Características oceanográficas del Golfo de Ancud

El Golfo de Ancud se encuentra entre los -41°30'S y los -42°15'S centrado en la latitud -73°O, extendiéndose entre la isla de Chiloé y el continente (Andrade, 1985). Se trata de un sistema de tipo estuarino con los pasos Nao y Queullín (seno de Reloncaví) por el norte, el canal de Chacao por el noroeste y los pasos Apiao y Desertores por el sur (González-Carrasco & Díaz-Naveaz, 2012). La topografía de esta región toma relevancia en la dirección del viento y las corrientes (Letelier et al., 2011). En el caso del viento de esta zona se Letelier et al., 2011 observó un predominio del viento proveniente del sur en primavera y sureste en primavera-verano; con presencia de eventos intensos de viento norte de corta duración, preferentemente en invierno. Las magnitudes en esta localidad fueron dominadas por el rango entre 1 y 10 ms^{-1} (80 % de las observaciones), seguida por un 15 % de eventos entre 10 y 20 ms^{-1} , 1,3 % de entre 20 y 30 ms^{-1} , y un 0,04 % de eventos mayores a 30 ms^{-1} . (letelier et al., 2011). La influencia en el predominio de la dirección del viento local en diferentes sectores del mar interior

de Chiloé (Cáceres et al., 2003; Letelier et al., 2011), mientras que en el exterior del MIC el viento estaría dominado por la circulación atmosférica regional, en la zona del interior son varios los accidentes geográficos que interfieren en la circulación del viento. Un ejemplo del efecto topografía queda claramente de manifiesto en la estación de faro Corona (registros históricos), ya que aparecen direcciones secundarias siguiendo la orientación del canal Chacao (Letelier et al., 2011). En cuanto a las corrientes que ingresan a la zona, Cáceres et al., 2003 visualizó que en el caso del canal del Chacao las velocidades típicas eran de $\sim 4\text{ms}^{-1}$, mientras que Artal et al., 2019 observó que durante el mes de enero del 2016 el 70 % de los días superó velocidades de 2 ms^{-1} con valores máximos de 6 ms^{-1} . Además, observó corrientes que presentaron valores mayores a los 2 ms^{-1} en un rango entre 20 y 30 % de los días; siendo 4 ms^{-1} los valores máximos observados para dicho canal (Artal et al., 2019).

La circulación dentro del golfo de Ancud está definida por las características oceanográficas que lo rigen. En el caso de la comunicación entre éste y el seno Reloncaví, ambos se encuentran separados entre sí por una constricción formada por las islas Puluqui y Quellin, quedando entre estas tres pasos; siendo el Queullin el más profundo con más de 300 m en su parte central (Araya-Vergara, et al., 2008). Los otros pasos no superan los 70 m de profundidad en el extremo noroccidental, el golfo de Ancud colinda con el océano pacífico, comunicado por el canal del Chacao, el cual tiene una profundidad aproximada de 60 m. Al sur del golfo de Ancud se encuentra el golfo Corcovado, la comunicación entre ambos golfos se da mediante los pasos Desertoires y Apiao; los cuales cuentan con una profundidad de 120 y 140 metros respectivamente (Silva et al., 1995).

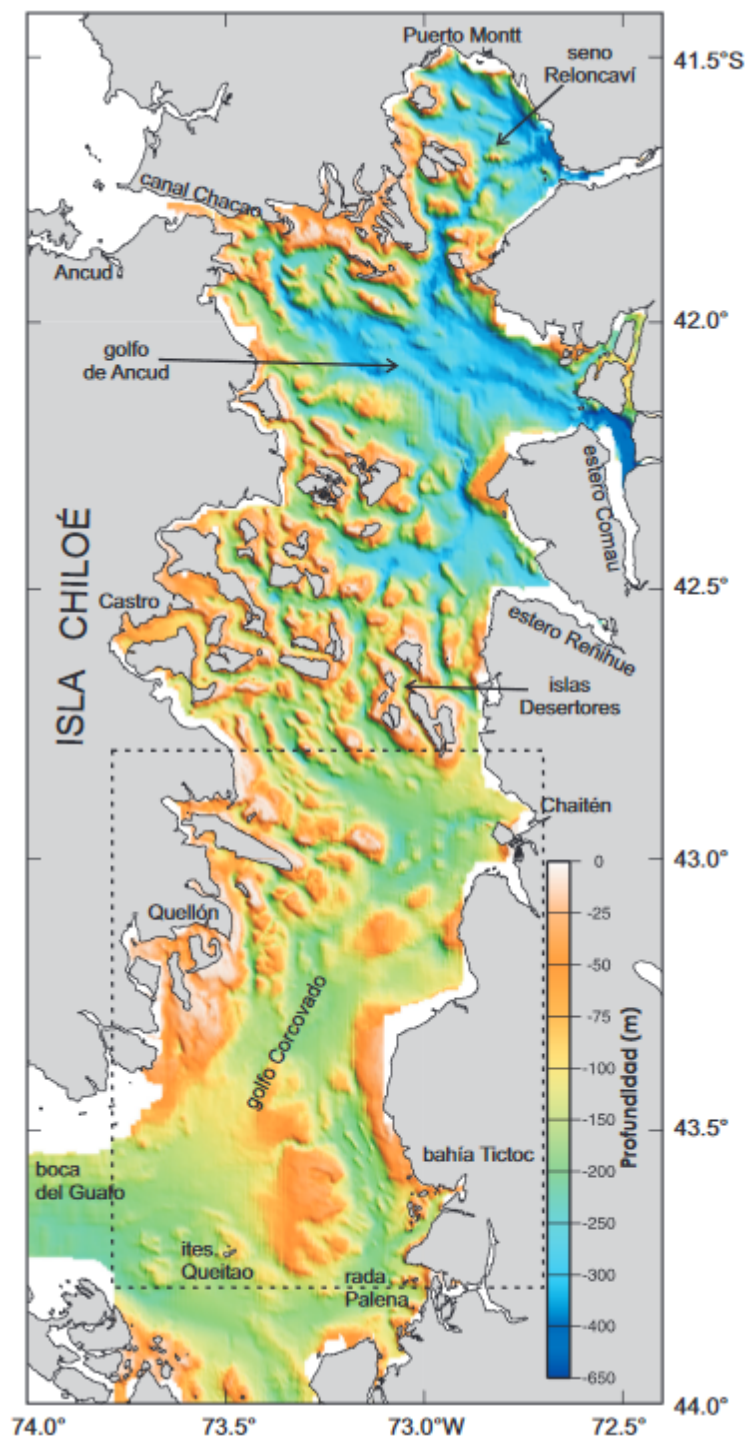


Figura 1.2.1: Batimetría del Mar Interior de Chiloé. Figura tomada de Rodrigo (2006)

Estos accidentes topográficos permiten identificar las masas de agua que circulan por el golfo de Ancud. En primera instancia se restringe la entrada de AESS para

toda la zona norte, quedando esta en la zona de la boca del Guafo y en menor medida en el canal Moraleda. En la capa profunda del golfo de Ancud se encuentra ASAAM; con circulación hacia el norte. Este es producto de la entrada de ASAA por la boca del guafo y la mezcla que ocurre en el golfo Corcovado con AD. Para el caso de la capa superficial predomina el AE proveniente del seno Reloncaví con una circulación hacia el sur. Es así como el ASAAM mezclada con el AE dominan en la zona del golfo de Ancud hasta el canal Moraleda, llenando las microcuencas con aguas ricas en oxígeno disuelto. Esta circulación facilita la ventilación de las microcuencas y evita la disminución del contenido de oxígeno disuelto a niveles cuasi-anóxicos o anóxicos en los canales y fiordos (Sievers Silva, 2006).

Las características oceanográficas del golfo de Ancud indican que, este posee una termoclina con una profundidad aproximada de 20 m y muy débiles haloclinas y pycnoclinas con profundidades similares a la termoclina (Sievers & Prado 1994; Silva et al., 1995, 1997; Sievers et al., 2002, 2006; Castro et al., 2015). A profundidades mayores de 30 m la temperatura tiende a ser más uniforme, oscilando alrededor de los 11°C. La distribución de salinidad bajo los 20 m es bastante uniforme en profundidad. La distribución de las isohalinas e isolíneas del contenido de oxígeno son similares entre ellas. Las cantidades de oxígeno para el golfo de Ancud y el seno Reloncaví tiene valores mayores a 7 ml/l y porcentajes de saturación sobre 120 %, mientras en el golfo Corcovado apenas superó los 5 ml/l, lo que corresponde a un valor de saturación de alrededor de 80 % (Silva et al., 1995).

1.3. Métodos de Detección de Remolinos

Para la detección de remolinos se puede usar tanto datos satelitales e in situ como resultados de modelos numéricos validados. Esta flexibilidad en cuanto a datos a utilizar permite que existan tanto formas basadas en esquemas eulerianos como lagrangianos (derivadores, Dong et al., 2011). En el caso de los esquemas

eulerianos la variedad es mayor que en el de los lagrangianos. Así, éstos pueden ser agrupados en tres: 1) tipo físico, 2) el tipo geométrico y 3) tipo híbrido.

1.3.1. Tipo Físico

El tipo físico establece variables, en función de propiedades físicas, determinarán si el fenómeno estudiado corresponde a un remolino o no. Para esto se fijan umbrales, identificándose el remolino una vez superado dicho umbral (Chaigneau et al., 2008). El principal método utilizado es el parámetro de Okubo-Weiss (OW) (Okubo, 1970; Weiss, 1991). Éste define un parámetro (parámetro de Okubo-Weiss, “W”) el cual relaciona la rotación y la deformación del fluido (Chelton et al., 2007) .

1.3.2. Tipo Geométrico

El tipo geométrico está basado en las propiedades geométricas del fluido. Éstas pueden ser líneas de corriente (Sadarjoen & Post, 2000; Chaigneau et al., 2008), vectores de velocidad (Nencioli et al., 2010), contornos cerrados de la anomalías del nivel del mar (ANM) o altura superficial del mar (ASM) (Chelton et al., 2011). Este método de identificación consiste en liberar un gran número de líneas de corriente sobre el campo de velocidad del dominio de estudio y seleccionar las curvas que tienen geometría circular o cerrada.

1.3.3. Híbridos

El tipo híbrido es la unión de los anteriores, el cual considera un remolino geostrófico como la región contenida en un contorno cerrado de ANM el cual está dominado por la vorticidad, por lo tanto, el parámetro OW es negativo (Halo et al., 2014).

1.4. Hipótesis

Patrones de circulación circulares observados en el golfo de Ancud corresponden a un remolino.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos Generales

Identificar y caracterizar, a través de datos numéricos, el remolino en el golfo de Ancud para los años 2018 y 2019; utilizando variables de temperatura del mar y velocidad de corrientes.

1.5.2. Objetivos específicos

- Cuantificar el número de remolinos diarios que se observó en el período de estudio.
- Identificar las coordenadas en las que se genera el fenómeno.
- Identificar el diámetro y profundidad del vórtice.
- Describir el comportamiento de la circulación de la zona.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Métodos de Okubo-Weiss

El parámetro de Okubo-Weiss, cuyo valor comúnmente es representado como " W ", es un método físico de identificación de remolinos. Un método físico es aquel que se basa en el cálculo de propiedades físicas y se necesita establecer un umbral para determinar la ubicación del remolino, así, un remolino se identifica cuando los umbrales de las propiedades físicas son excedidos (Chaigneau et al., 2008). Éste permite identificar las regiones de un flujo donde domina el estiramiento y las regiones donde domina la vorticidad. Okubo-Weiss considera que un vórtice o remolino existe cuando la rotación del fluido domina por encima de su deformación, para determinar si un proceso corresponde a estiramiento o vorticidad se establece un umbral negativo, y solo se seleccionan las regiones donde el parámetro de Okubo-Weiss está por debajo de ese umbral negativo; el valor de éste es $W = -2 \times 10^{12} \text{ s}^{-2}$ (Chelton et al., 2007) y se define con la ecuación:

$$W = S_n^2 + S_s^2 - \omega^2 \quad (2.1.1)$$

Al aplicar este criterio de partición de flujo, se puede observar que la estructura

general de un remolino consiste en una región interna dominada por la vorticidad, el núcleo del remolino, rodeado por una región dominada por la deformación, la celda de circulación (Elhmaidi et al., 1993). El borde del núcleo se puede identificar como las líneas cerradas con $W = 0$. Esta separación del campo en términos del signo de W ha demostrado ser un criterio sólido para domar núcleos de remolinos de flujos de fluidos complejos (Jeong & Hussain, 1995; Pasquero et al., 2001; Isern-Fontanet et al., 2003). Además, el límite del núcleo constituye una barrera para el intercambio de partículas con la celda circundante, luego las partículas atrapadas dentro del núcleo del remolino permanecen allí a menos que el remolino se destruya o se expulsen a través de un proceso de filamentación. En la celda de circulación, en cambio, existe una intensa agitación e intercambio de partículas con el campo de fondo. Durante el proceso de dispersión, las partículas neutras muestran una tendencia a concentrarse en dicha región (Provenzale, 1999).

2.1.1. Críticas

La principal crítica que recibe este método surge debido a que, al utilizarlo, se considera que un remolino existe solo cuando la rotación del fluido es mayor que la deformación. Para esto, el parámetro " W " debe ser negativo, con un valor menor al umbral establecido para las regiones dominadas por la vorticidad ($W = -2 \times 10^{12} \text{ s}^{-2}$; Chelton et al., 2007). Chaigneau plantea que estos umbrales pueden ser establecidos de forma arbitraria (Chaigneau et al., 2008).

Otra crítica consiste en que, en el caso de contar con datos de ASM, los métodos basados en la vorticidad no son tan adecuados como los geométricos debido a que requieren el cálculo de las derivadas de la ASM, que amplifican cualquier ruido que exista en el campo (Chelton et al., 2011)

En este trabajo se utilizó este método debido a que no se usaron datos de ASM. Además se utilizó como umbral del parámetro $W = -2 \times 10^9 \text{ s}^{-2}$, valor menor al aceptado.

Capítulo 3

Metodología

Para esta tesis se utilizaron datos de temperatura, salinidad y velocidad zonal y meridional de la corriente, durante 2018-2019, provenientes de salidas del Modelo Operacional Sur-Austral, MOSA (Ruiz et al., 2021). MOSA es un modelo numérico basado en CROCO (Debreu et al., 2012) y desarrollado por el Instituto de Fomento Pesquero, IFOP, el cual nace en respuesta a la necesidad de mejorar la gestión y control de las áreas de explotación marina de las regiones de Los Lagos y Aysén. Si bien es un modelo numérico, MOSA está validado para salidas desde el 2018 en adelante.

Para el análisis de datos se utilizó Matlab con sus librerías de NetCDF además de las herramientas de post procesamiento `croco_tools` (Penven et al., 2006).

3.1. Modelo Numérico CROCO

CROCO (Coastal and Regional OceanCommunity Model, Debreu et al., 2012), es un sistema de modelado oceánico construido sobre el modelo ROMS_AGRIF (Shchepetkin & McWilliams., 2003, 2005; Debreu et al., 2008) y el núcleo no hidrostático de SNH que incluye gradualmente algoritmos de MARS3D (Tessier, 2006; Dufois, 2008; Lazure & Dumas, 2008). El proyecto CROCO contiene el código

fuelle y la caja de herramientas de matlab de pre y posprocesamiento croco_tools. Se trata de un modelo tridimensional, diseñado para simulaciones regionales. Resuelve las ecuaciones primitivas (conservación del momentum, hidrostática, continuidad, conservación de traza y la ecuación de estado), las cuales son una variante del sistema de Navier-Stokes, donde se considera la superficie oceánica libre, utiliza también los principios de conservación de masa, momento y energía. Las ecuaciones son discretizadas sobre una grilla tridimensional Arakawa C (Arakawa, A., & Lamb, V. R., 1977). Las coordenadas horizontales son ortogonales curvilíneas, mientras que las coordenadas verticales son coordenadas sigma (siguen la topografía).

3.2. MOSA

Es un modelo hidrodinámico basado inicialmente en el modelo ROMS-AGRIF posteriormente actualizado al modelo CROCO (<http://www.croco-ocean.org>), que genera pronósticos oceanográficos a un horizonte de 3 días. El modelo tiene una resolución de 1.2 kilómetros y 42 niveles verticales con distribución tipo sigma, es decir, son 42 niveles de espesor variables sujetos a los cambios de la batimetría. El modelo de elevación digital es construido con datos batimétricos de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), complementada con información del producto General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) para la zona oceánica y mediciones locales multihaz para el mar interior y zonas costeras.

El modelo recibe de condiciones de borde con un paso de tiempo de un día en los bordes abiertos del dominio. Los bordes abiertos son aquellos límites por los cuales existe un transporte de agua asociado. A su vez, a lo largo los bordes abiertos se utiliza una capa esponja de un ancho de 10 km, para evitar ruidos y generación de ondas ficticias producidas por reflexión de ondas en los bordes

(Penven et al., 2006). Las condiciones de borde utilizadas para el modelo son obtenidas del modelo global Mercator-Ocean perteneciente a Marine Copernicus (www.mercator-ocean.fr) y una condición inicial creada a partir del pronóstico generado el día anterior.

Para el caso de la superficie libre del agua se necesita información atmosférica como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor de onda larga y onda corta, precipitación, y humedad. Los campos de las variables atmosféricas son obtenidos del pronóstico operacional atmosféricos MOSA-WRF de 5 km de resolución espacial, el cual está basado en el modelo Weather Research Forecast (WRF, Skamarock et al., 2005). Ambos modelos tienen un dominio que comprende las regiones de Los Lagos y Aysén, limitando entre el Seno Reloncaví por el norte y la Península de Taitao por el sur, incluyendo la costa continental oriental de la región comprendida, mientras que el borde occidental se ubica en los 79 °W.

En el caso de entradas de agua dulce estas se incorporan al modelo como caudales mensuales promedio de 35 ríos en el dominio, estos promedios son calculados a partir de datos de la Dirección General de Aguas de Chile (DGA) y un modelo hidrológico basado en el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994). Por otro lado, en el caso de la onda de marea, se utilizan 10 armónicos de marea sin amortiguamiento. Estos datos son derivados desde el producto de modelación inversa de mareas barotrópicas TPXO7 (Egbert & Erofeeva, 2002). A partir de esto MOSA entrega pronósticos de variables oceanográficas en campos 3-d de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar con frecuencia horaria.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo de los procesos que se ejecutan diariamente por el modelo, CITAR FIGURA

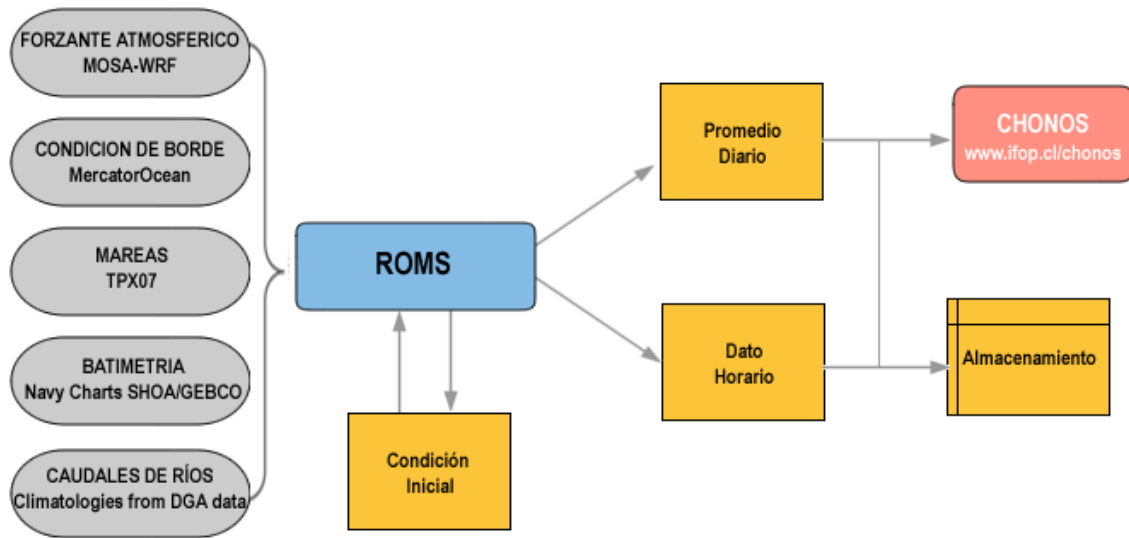


Figura 3.2.1: Diagrama de flujo funcionamiento MOSA-ROMS (Ruiz et al., 2021)

3.3. Método Detección

Se desarrolló un método de detección automática que consistía en la identificación de figuras circulares mediante la función de Matlab “`imfindcircles`”. Para utilizar esta función se deben abrir imágenes, éstas deben estar en escala de grises. Es por esto que se recomienda que las paletas a color de los gráficos que se evaluarán el valor mínimo y el máximo tengan el mayor contraste posible; en el caso de los gráficos resultantes del parámetro de Okubo-Weiss se utilizó la paleta “hot”.

La función entrega resultados del radio de los círculos detectados y el centro, ambos valores en píxeles, por lo tanto a la hora de evaluar más de una imagen éstas deberán tener las mismas dimensiones, para posteriormente hacer la conversión a la medida esperada. Además, se limitó las coordenadas en las cuales podrían aparecer centros de remolinos en función de una revisión visual de los resultados. Finalmente se restringió un rango de radios posibles, usando el mismo criterio de los centros.

Así, los valores se guardaron como resultados diarios, de no cumplir con los parámetros mencionados ese día quedaría guardado con un valor de cero en cada variable (radio, coordenada x y coordenada y). Por lo tanto se presentó la limitación de solo poder considerar un remolino diario en los cuales la energía era muy baja (remolinos con diámetros menores a 10 km) para la aparición de un solo gran remolino pero en la zona se encontraba más de una estructura semicircular pequeña.

3.4. Caracterización

Se hizo la conversión de los resultados en píxeles, obteniendo así coordenadas latitudinales y longitudinales y en vez de usar el dato de radios se trabajó con diámetros. Se obtuvo las dimensiones del remolino para distintos periodos del año, por cada año, para luego hacerlo estacionalmente. Posteriormente se hizo un histograma de dos dimensiones para obtener la distribución espacial del remolino.

Capítulo 4

Resultados

En este apartado se presentarán resultados en detalle para la semana que comienza el día 1 de febrero hasta el 6 de febrero, el criterio de selección de estos días se basó en que estas fechas se encuentran justo en la mitad del verano del Hemisferio Sur. Así, para efectos prácticos, será ilustrativo hacer la comparación con lo sucedido para la semana del 3 de agosto hasta el 8 de agosto, semana que marca la mitad del invierno, esto mostrará un contraste visible de los resultados. En la presentación de los resultados físicos no se mostrarán los resultados del año 2019, debido a que estos son similares a los del 2019, por lo tanto sería una información redundante y no contribuiría en gran medida con la exposición; es por esto que los resultados el 2019 se podrán encontrar en el **Anexo.** En cuanto a la cuantificación de los datos (días con presencia de remolino, y diámetro de éste) sí se consideraron esos resultados.

4.1. Gradientes de temperatura

El gradiente de temperatura es una medición de la variación de temperatura de un punto respecto a otro punto contiguo. Por lo tanto, la medición de este valor será en $^{\circ}Ckm^{-1}$. Si bien esta medición es demostrativa de una concentración de

temperaturas en estructuras cuasi-circulares para períodos templados, en períodos más fríos ocurre una homogeneización de las temperaturas superficiales de la zona del Golfo de Ancud, haciendo menos visible la estructura de un posible remolino.

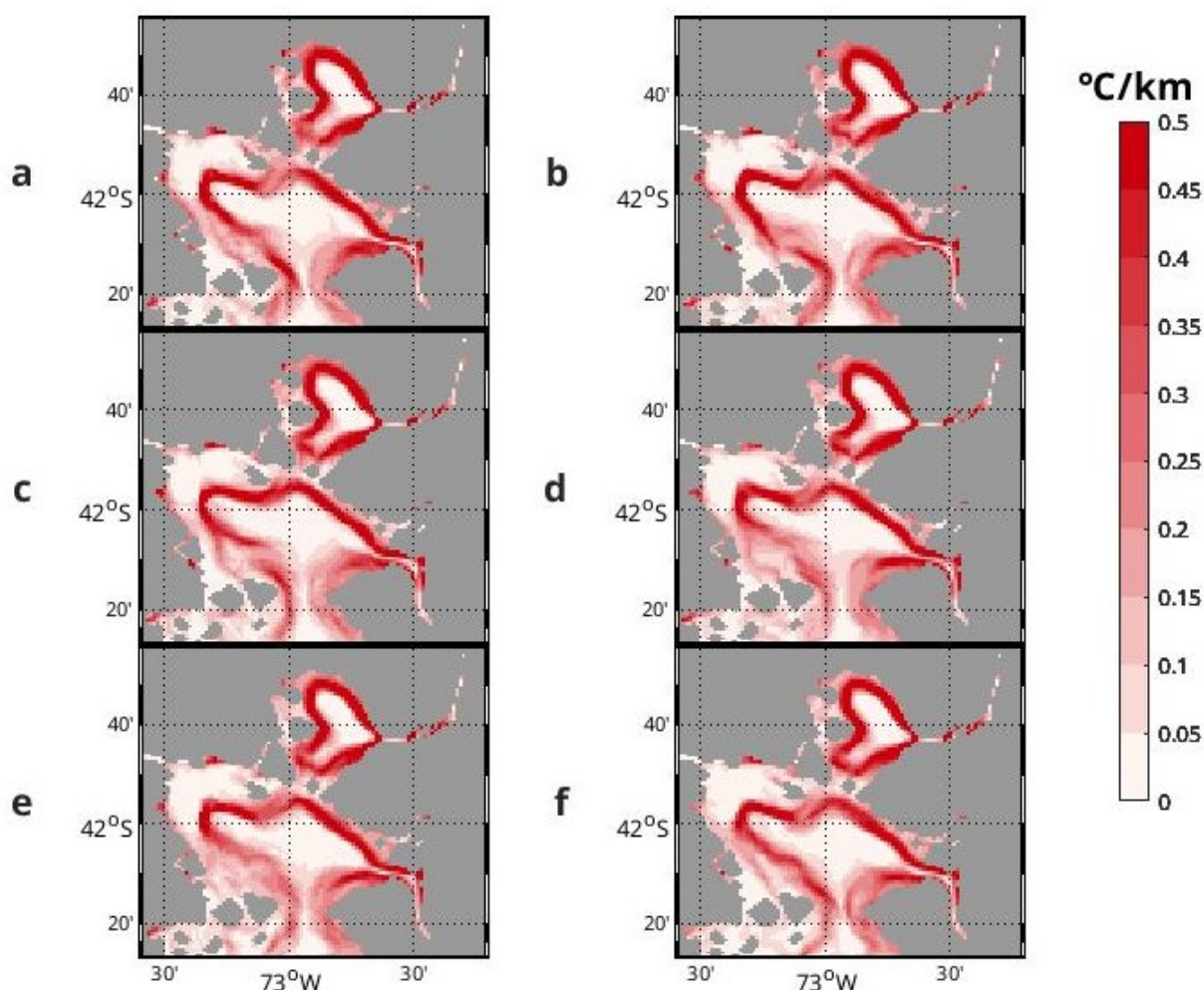


Figura 4.1.1: Gradientes de temperatura superficial durante el 1 al 6 de febrero. Ordenado desde la a) hasta la f).

Los resultados de los gradientes de temperatura para la semana del 1 al 6 de febrero del 2018 (8.1.8) nos muestran un aumento de temperatura entre la zona central del golfo de Ancud y el exterior, además de una estabilización de la temperatura entre el centro y los bordes donde el gradiente es más pronunciado. Por ende, nos muestra que existe una concentración de temperaturas más altas tanto en el centro del golfo de Ancud como en la zona del seno Reloncaví (no se estudiará esa zona),

en las cuales el núcleo y los bordes mantienen valores similares de temperatura.

Anteriormente se mencionaba que los gradientes de temperatura, en esta zona y bajo las características del fenómeno estudiado serían resultados más discretos en períodos con temperaturas más bajas, debido al clima más austral de la región.

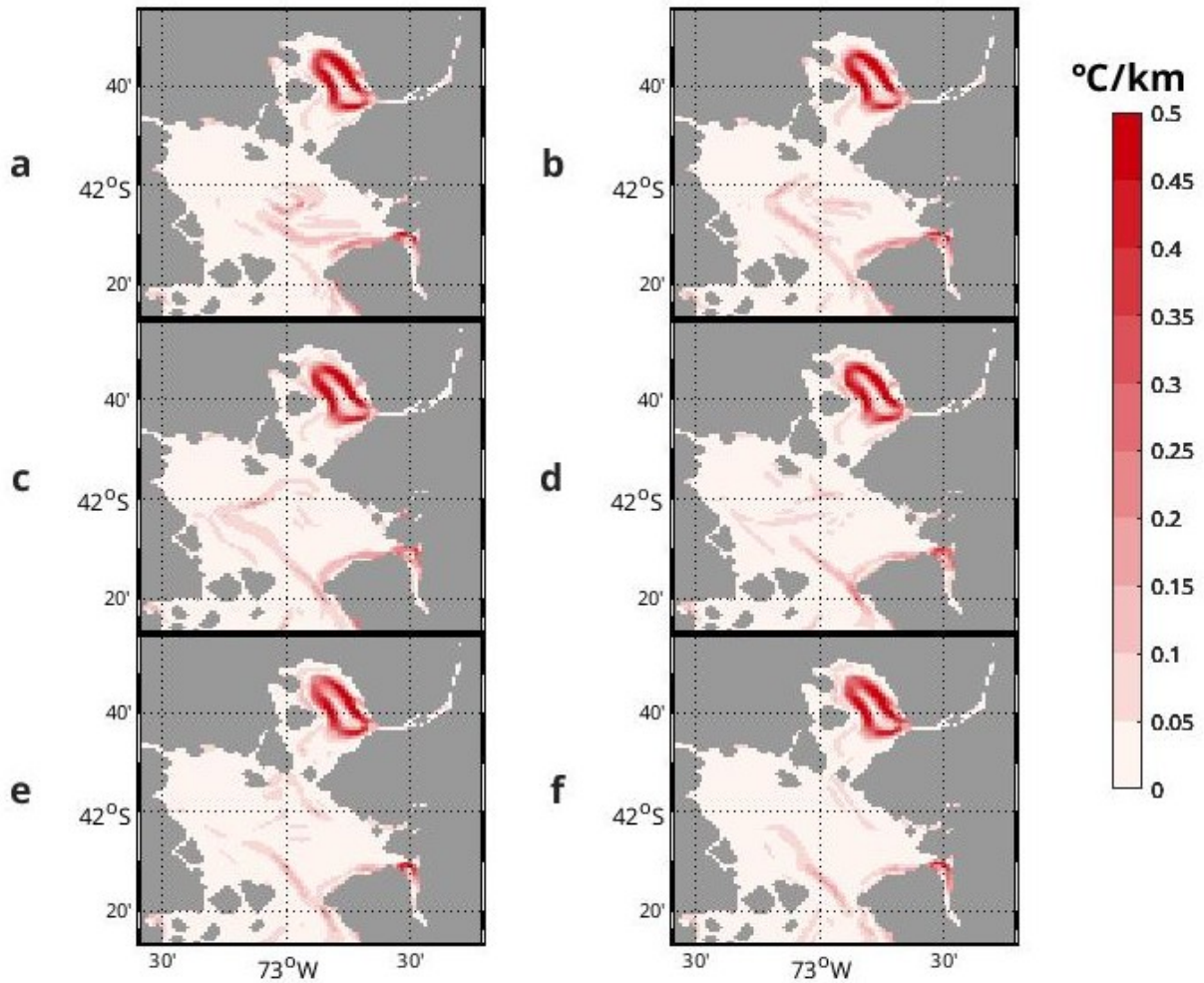


Figura 4.1.2: Gradientes de temperatura superficial durante el 3 al 8 de agosto. Ordenado desde la a) hasta la f).

Los resultados de los gradientes de temperatura para la semana del 3 al 8 de agosto del 2018 (4.1.2) nos muestran aumentos poco pronunciados y puntuales de temperatura en distintas zonas del golfo de Ancud; sin mostrar un patrón claro como se observó en los resultados de febrero. En general la zona se ve con gradientes tendientes a cero en la mayoría de su extensión, salvo la zona del seno

Reloncaví en la cual se ve un gradiente cuasi-circular más reducido que el de la época estival, centralizado en el seno y con valores de temperaturas constantes entre el núcleo y el borde.

4.2. Vorticidad

La vorticidad es una medida de rotación del fluido, está estrictamente relacionado con la circulación. En el caso de que los valores de vorticidad sean positivos el fluido tendría una rotación en sentido antihorario. mientras que en el caso de que la vorticidad sea negativa, el fluido estaría rotando en sentido horario. En el hemisferio sur los giros en sentido horario (antihorario) corresponden a ciclones (anticiclones), mientras que en el hemisferio norte es lo opuesto, los anticiclones (ciclones) rotan en sentido horario (antihorario).

Como se observa de las figuras 4.2.1 y 4.2.2 los valores resultantes de esta variable oscilan entre -10^{-4} y 10^{-4} , presentando así sectores con vorticidad negativa, con vorticidad positiva y sin vorticidad. El sector estudiado puntualmente presenta vorticidad negativa mayormente, especialmente en época estival.

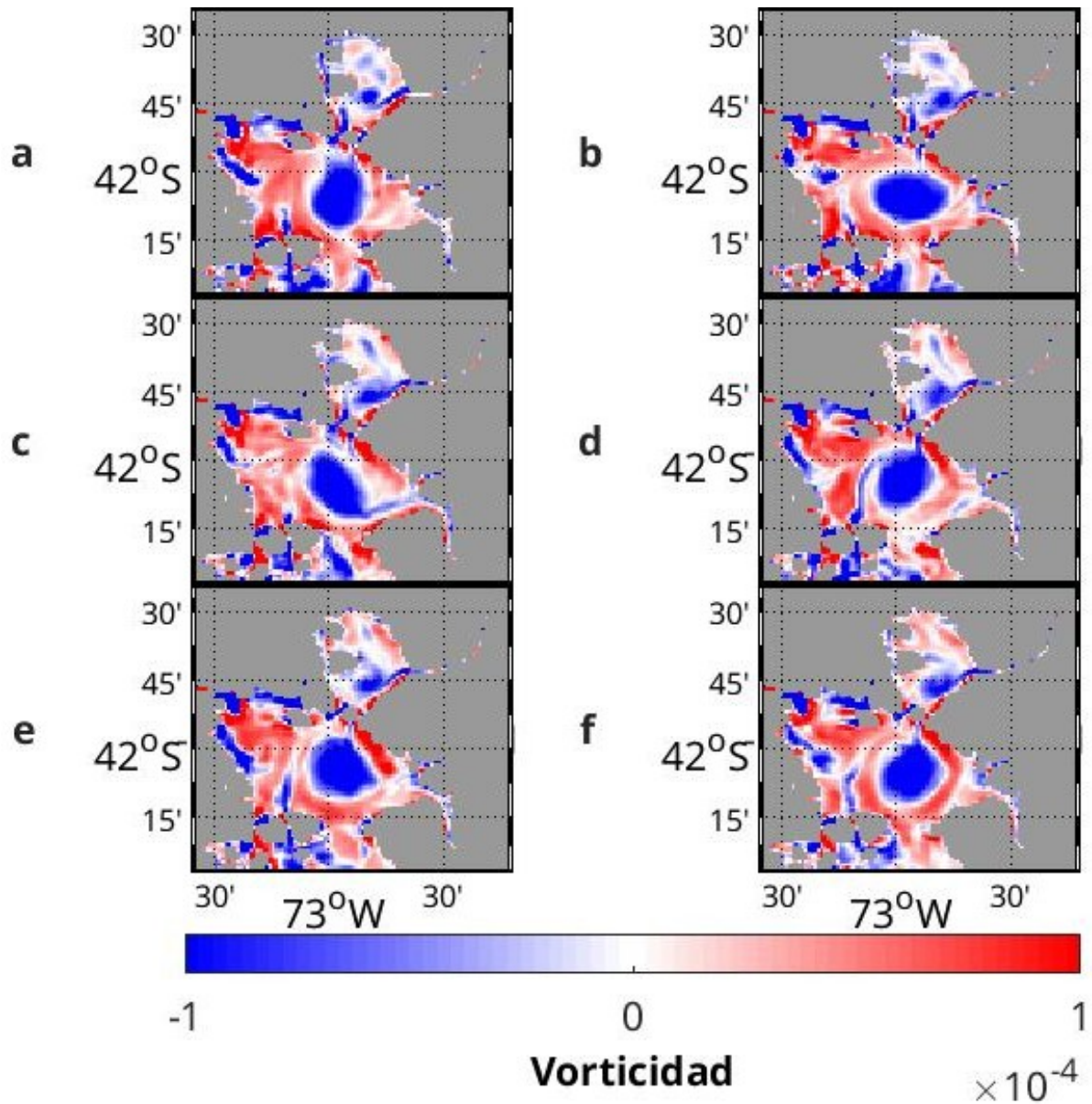


Figura 4.2.1: Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 1 y el 6 de febrero del 2018. Ordenado desde la a) hasta la f).

En la semana del 1 al 6 de febrero se presentó valores continuos de vorticidad negativa en un área cuasi-circular cerrada en la zona de estudio con un perímetro sin vorticidad y luego distintos valores de vorticidad de distintas intensidades y sentidos para el resto de la zona graficada. El área del posible remolino que nos presentan los gradientes de temperatura es mayor que los observados en los datos de vorticidad.

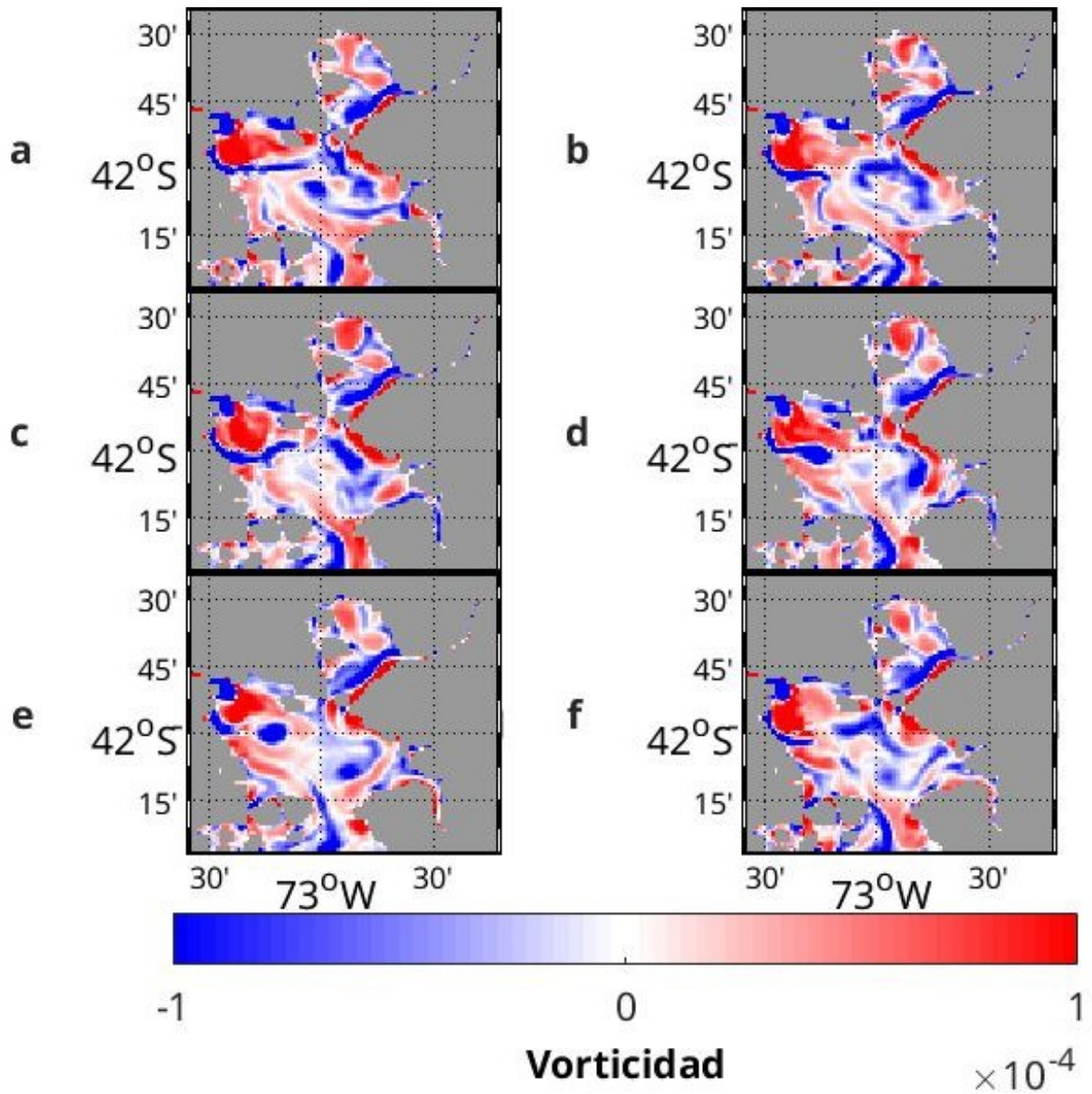


Figura 4.2.2: Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 3 y el 8 de agosto del 2018. Ordenado desde la a) hasta la f).

En el caso de la semana entre el 3 y el 8 de agosto hay valores de vorticidad de distintas intensidades y sentidos, sin embargo no se encuentra una estructura cerrada circular o cuasi-circular en la zona donde se identificó el remolino. No obstante, el día 7 de agosto (imagen (e), 4.2.2) se observan dos estructuras cerradas semicirculares con un perímetro menor a las observadas anteriormente y desplazadas del centro que se tenía considerado.

4.3. Velocidades de corriente

Otra forma de evaluar el sentido de rotación del remolino es a través de las velocidades de corriente, ya que éstas muestran cómo es la circulación de la zona de estudio; con un corte vertical podremos evaluar las direcciones de las corrientes. Además observaremos la profundidad del remolino, la intensidad de estas corrientes a lo largo del año, y el radio de éstas. Los datos de velocidades son entregados en componentes, está la zonal (U) y la meridional (V).

En esta sección se presentarán los resultados de las velocidades de corriente (componente zonal), para esto se hizo un corte vertical de norte a sur. Este corte se realizó en los $72,993^{\circ}O$, desde $41,872^{\circ}S$ hasta $42,3366667^{\circ}S$. El motivo de hacer el corte en esa coordenada longitudinal fue debido a la proximidad al centro del remolino que presentó al comienzo de este trabajo, luego se mantuvo debido a que ya se habían hecho los cálculos para esa zona. Para el caso de el punto de inicio y desenlace se buscó que éste abarcara el mayor tramo posible del golfo de Ancud.

Las velocidades de corriente representan la circulación de los fluidos en la zona, en el estudio de un remolino se encuentran dos corrientes de agua de dimensiones similares con sentidos opuestos de velocidad de corriente. Muestra también la profundidad del núcleo y la variabilidad de la intensidad de estas velocidades.

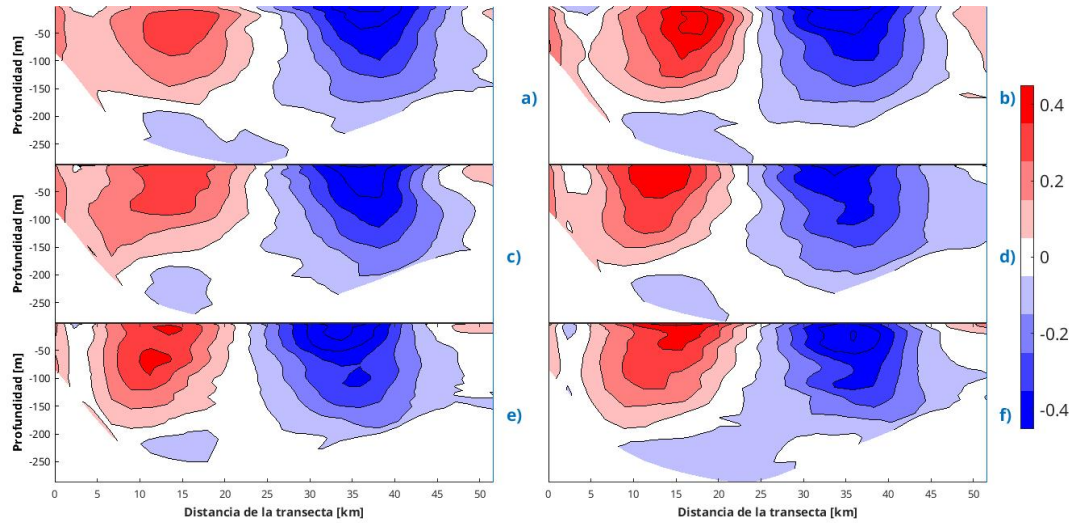


Figura 4.3.1: Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 1 al 6 de febrero del 2018. Ordenadas desde la a) hasta la f).

Entre el 1 y el 6 de febrero se presentan velocidades de corriente máximas entre -0.4 y 0.4 ms^{-1} . Se observa un núcleo de mayores intensidades presente en los primeros 100 metros, siendo más amplio el de las velocidades oeste, en ambos casos existe una disminución gradual tanto con la profundidad como con la latitud.

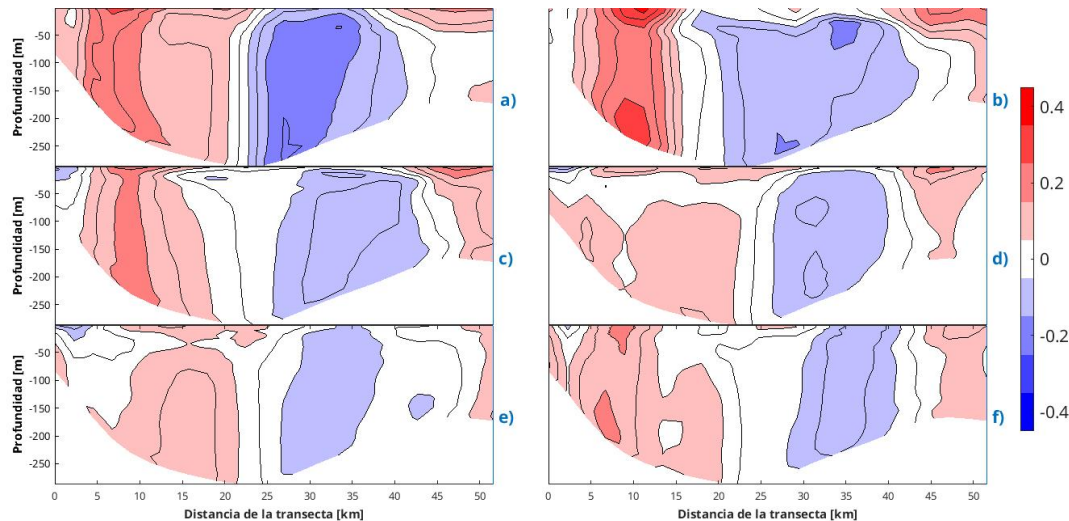


Figura 4.3.2: Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 3 al 8 de agosto del 2018. Ordenadas desde la a) hasta la f).

Para el caso de las velocidades de corriente en invierno las intensidades bajan, el

núcleo no se encuentra constantemente en la superficie y las corrientes se extienden por toda la columna. Hay desplazamiento de las columnas y en algunos casos se amplía la distancia entre columnas como el 8 (imagen (f), 4.3.2).

4.4. Parámetro de Okubo-Weiss

El parámetro de Okubo-Weiss distingue zonas en las que pueda ocurrir un remolino polarizando el espacio a estudiar en dos posibles resultados; valores positivos representan la deformación del fluido mientras que los valores negativos representan la vorticidad relativa (ambos casos del orden de $10^{-9}s^{-2}$). Los valores cercanos al cero representarán o bien la inexistencia de deformación y vorticidad relativa, o que ambas se encuentran en cantidades similares.

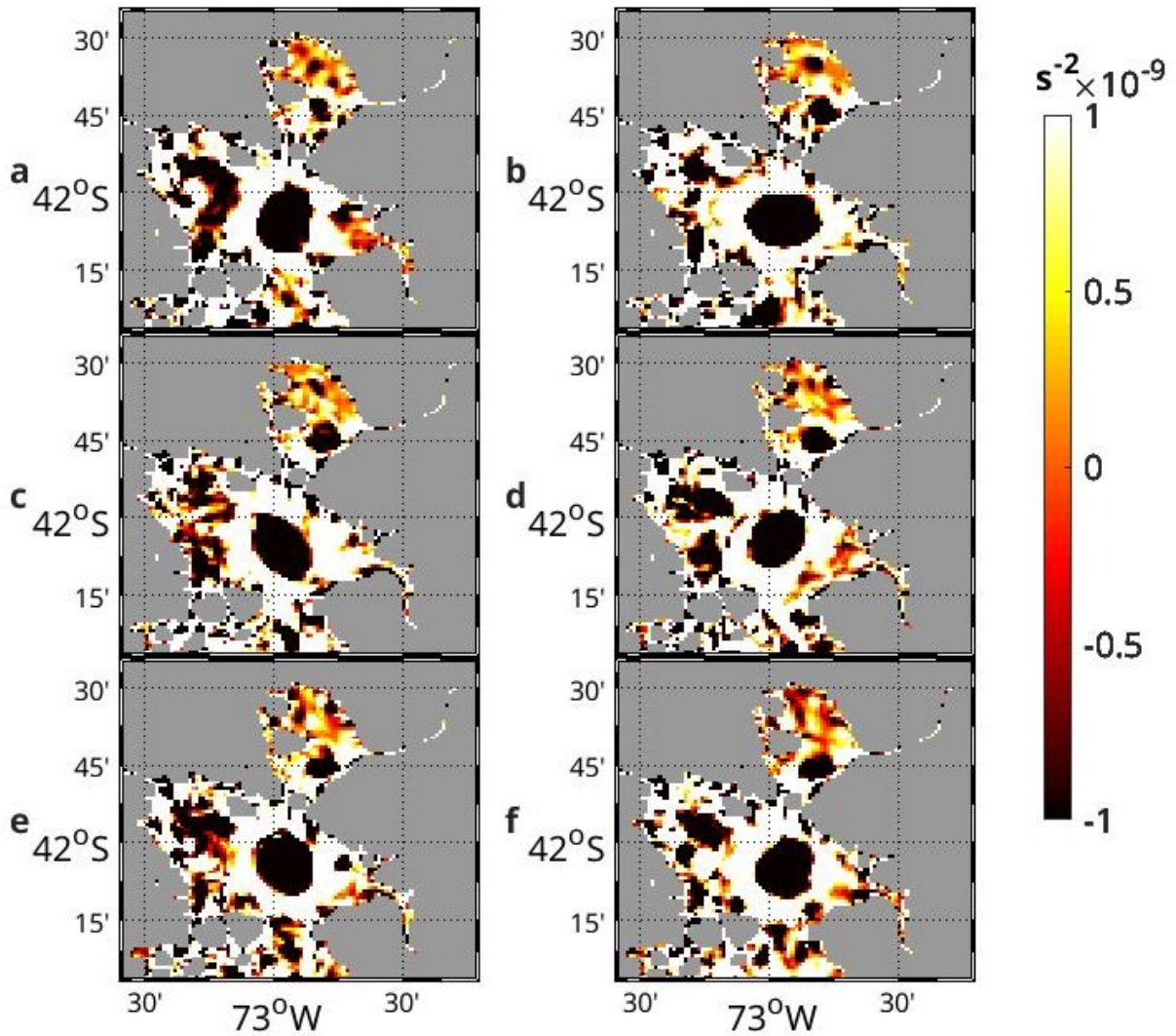


Figura 4.4.1: Valores diarios de OW estivales del año 2018. Correspondiente al período entre el 1 y 6 de febrero; ordenados de la a) hasta la f)

En la semana del 1 al 6 de febrero se presentan valores de vorticidad bajo el parámetro de Okubo-Weiss centrado en los puntos donde se ha venido estudiando el fenómeno. Estos resultados responden a un fenómeno cuasi-circular cerrado, con valores de vorticidad homogéneos en todo el área y rodeados de valores de deformación del fluido.

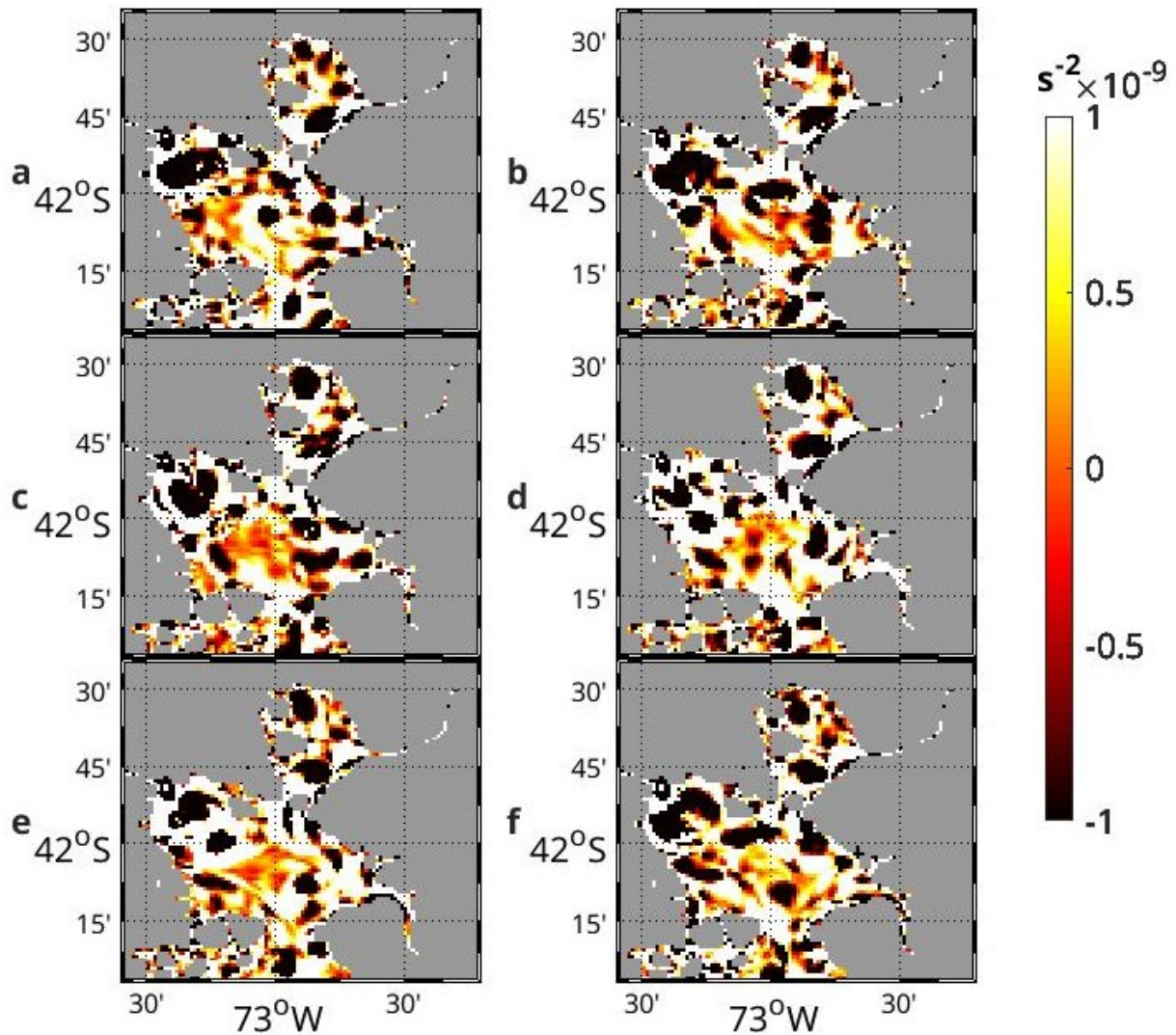


Figura 4.4.2: Valores diarios de OW invernales del 2018. Correspondiente al período entre el 3 y 8 de agosto; ordenados de la a) hasta la f).

En este parámetro, la semana invernal continúa con la tónica que se ha observado con los resultados presentados anteriormente. Sin embargo, el 3 de agosto (imagen (a), 4.4.2) se observa un valor de vorticidad relativa cerrada, cuasi-circular cercana al área de aparición del remolino. Abriendo la posibilidad de que el remolino sí esté presente en invierno pero con menor energía que en época estival.

4.5. Identificación

La identificación se realizó mediante el método automático explicado en el capítulo anterior, identificándose 633 remolinos de 703 días analizados. 338 remolinos del año 2018 de 365 días analizados y 295 remolinos en el año 2019 de 342 posibles. Como los datos utilizados son diarios se considerará como remolino los días que se detecten, más adelante se discutirá si estos corresponden a un solo fenómeno constante con una duración mayor o más de un evento.

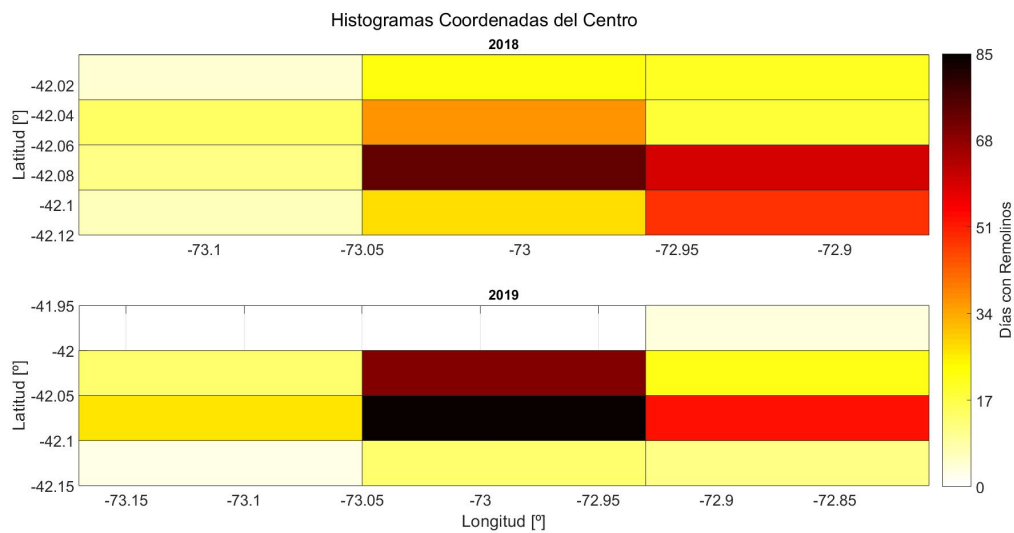


Figura 4.5.1: Histograma de centros de remolinos detectados, en primer lugar para el año 2018 y 2019.

El histograma de centros muestra una concentración en dos puntos principalmente aquellas que se encuentran entre $73,05 - 72,1^{\circ}\text{O}$ y $42,05 - 42,1^{\circ}\text{S}$; en estos cuatro contenedores se encuentran el 42,5 %. El perímetro que está formado compuesto por una distancia de 14,87 km longitudinales y 16.7 km latitudinales.

Rango de Diámetros [km]	Número de Remolinos [Días]
10-15	79
15-20	58
20-25	137
25-30	36
30-35	9
35-40	16
40-45	3

Cuadro 4.5.1: Tabla con los valores del histograma de diámetros, año 2018.

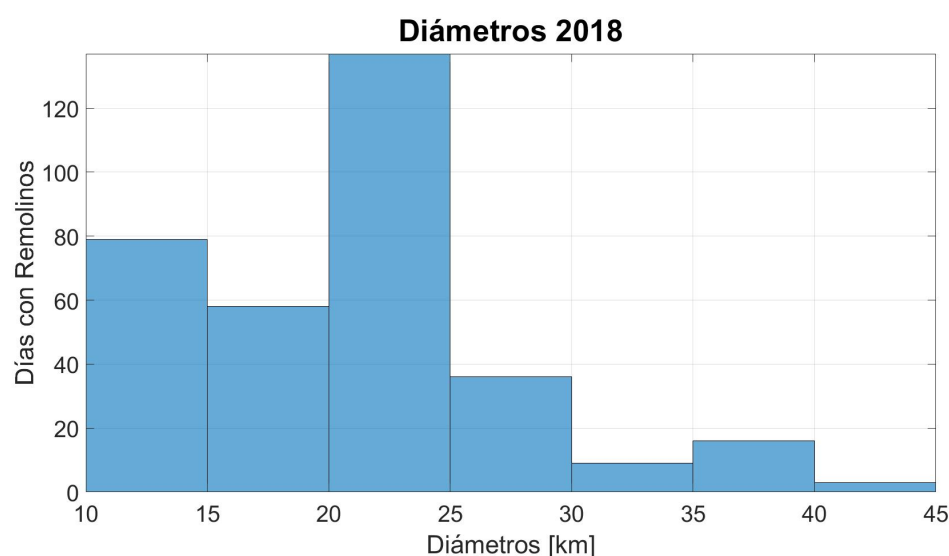


Figura 4.5.2: Histograma de diámetros para los remolinos detectados en el golfo de Ancud durante el 2018.

El histograma de diámetros anuales para el 2018 arroja que: 79 días con remolino tienen eventos entre 10 y 15 km, 58 entre 15 y 20 km, 137 entre 20 y 25 km, 36 entre 25 y 30 km, 9 entre 30 y 35 km, 16 entre 35 y 40 km, y finalmente 3 entre 40 y 45 km.

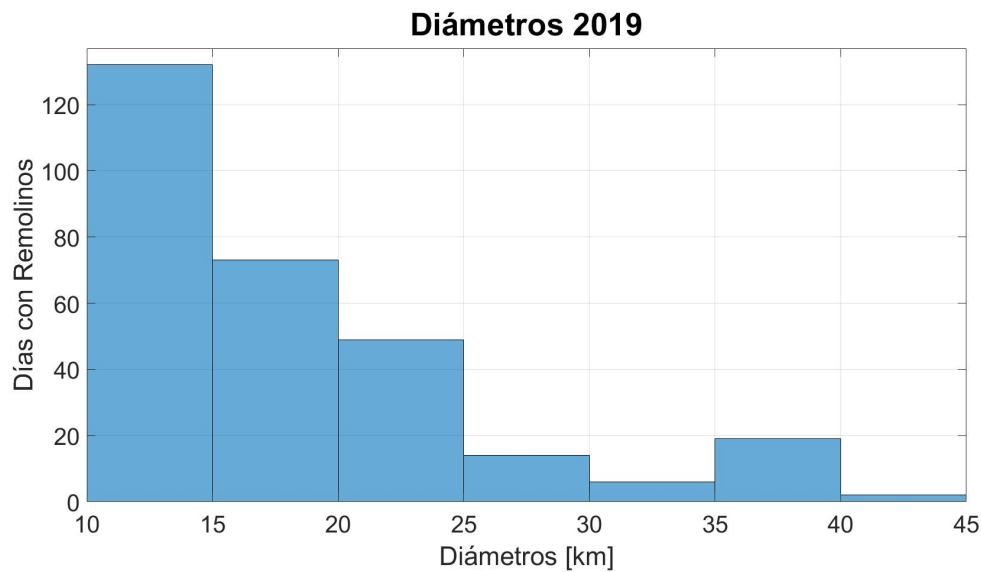


Figura 4.5.3: Histograma de diámetros para los remolinos detectados en el golfo de Ancud durante el 2019.

Mientras que en el histograma de diámetros anuales para el 2019 podemos ver lo siguiente: 132 días con remolino tienen eventos entre 10 y 15 km, 73 entre 15 y 20 km, 49 entre 20 y 25 km, 14 entre 25 y 30 km, 6 entre 30 y 35 km, 19 entre 35 y 40 km, y finalmente 2 entre 40 y 45 km.

Rango de Diámetros [km]	Número de Remolinos [Días]
10-15	132
15-20	73
20-25	49
25-30	14
30-35	6
35-40	19
40-45	2

Cuadro 4.5.2: Tabla con los valores del histograma de diámetros, año 2019.

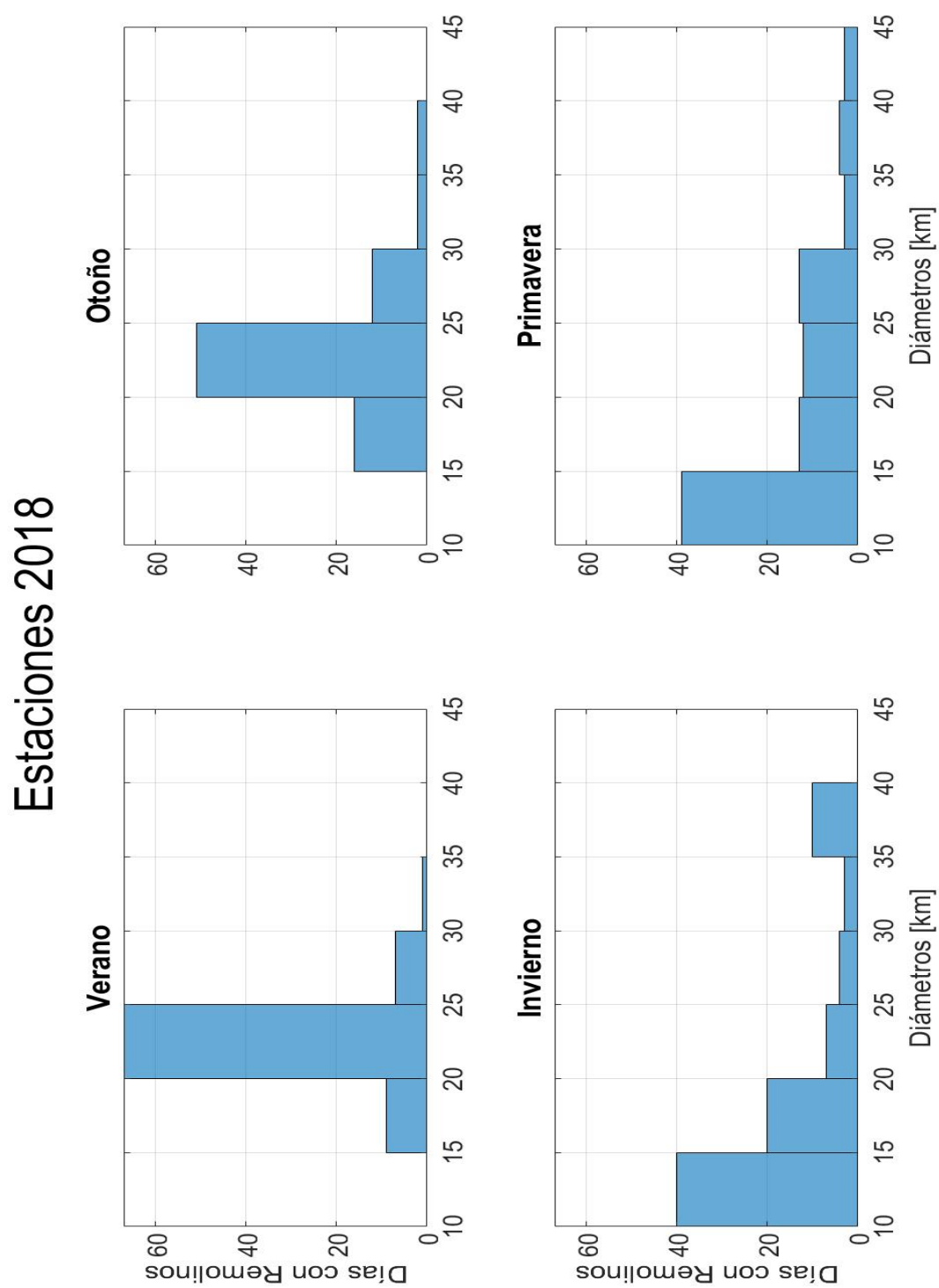


Figura 4.5.4: Histograma de mediciones de diámetros para el golfo de Ancud agrupado por estaciones meteorológicas, caso año 2018.

	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Rango de Diámetros [km]	Número de Remolinos [Días]	Número de Remolinos [Días]	Número de Remolinos [Días]	Número de Remolinos [Días]
10-15	0	0	40	39
15-20	9	16	20	13
20-25	67	51	7	12
25-30	7	12	4	13
30-35	1	2	3	3
35-40	0	2	10	4
40-45	0	0	0	3

Cuadro 4.5.3: Tabla con los valores del histograma de diámetros para el año 2018

En los gráficos de las estaciones para el 2018 podemos ver que, de los 84 días con remolinos de verano la que tiene mayor presencia es el rango entre 20 y 25 km con 67 reiteraciones. En otoño también domina este mismo rango con 51 días de los 83 con remolino. En invierno el rango que más se repite es el entre los 10 y 15 km con 40 eventos. Finalmente es primavera vuelve a ser el rango entre los 10 y 15 km el que contiene más casos con 39.

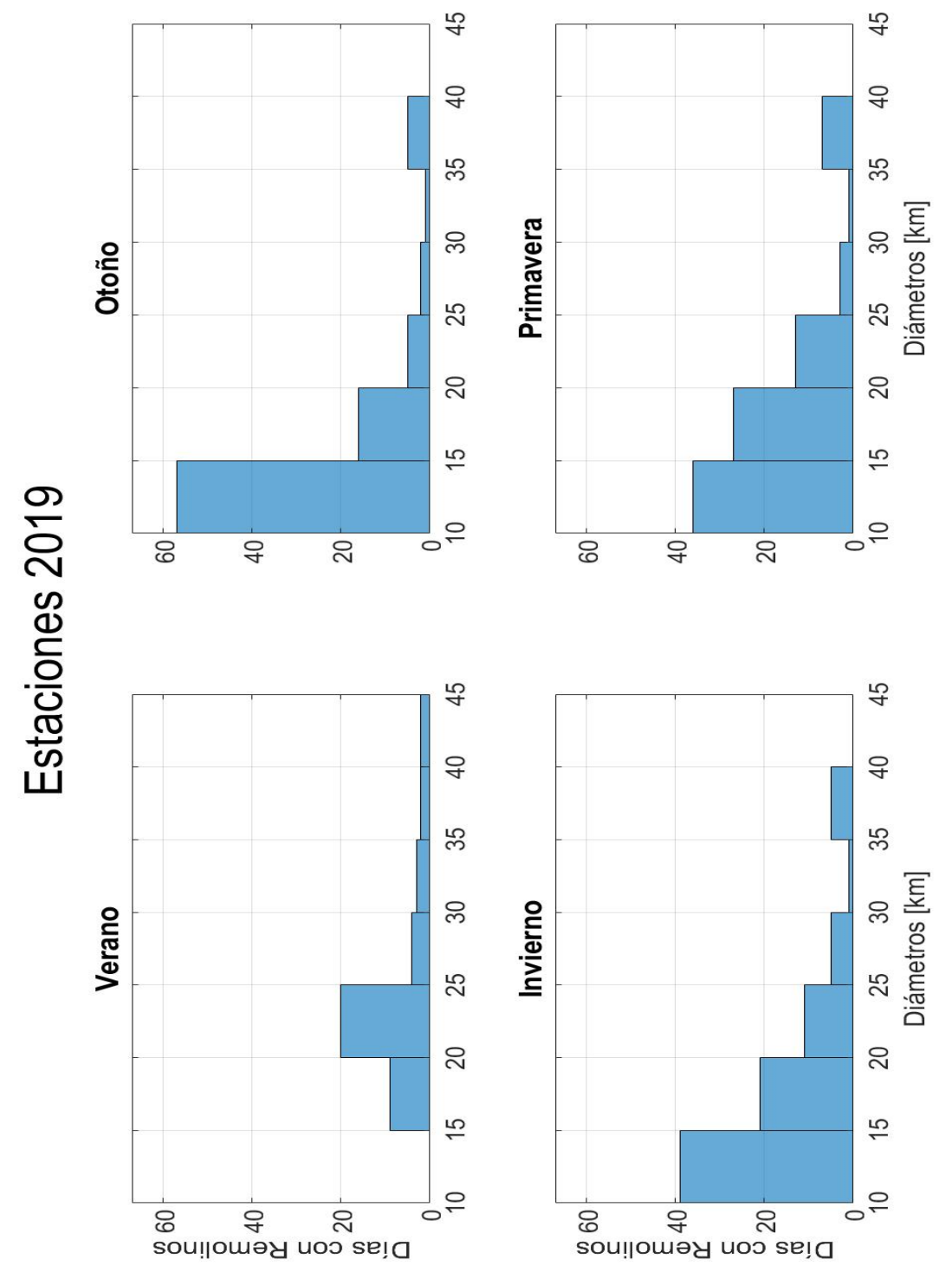


Figura 4.5.5: Histograma de mediciones de diámetros para el golfo de Ancud agrupado por estaciones meteorológicas, caso año 2019.

	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Rango de Diámetros [km]	Número de Remolinos [Días]	Número de Remolinos [Días]	Número de Remolinos [Días]	Número de Remolinos [Días]
10-15	0	57	39	36
15-20	9	16	21	27
20-25	20	5	11	13
25-30	4	2	5	3
30-35	3	1	1	1
35-40	2	5	5	7
40-45	2	0	0	0

Cuadro 4.5.4: Tabla con los valores del histograma de diámetros para el año 2019

Por otra parte, los gráficos de estaciones para el 2019 nos dicen que, en verano el rango con mayor cantidad de eventos corresponde al que va entre 20 y 25 km con 20 de 40 días con remolinos. en otoño 57 de los 86 casos identificados corresponden al rango entre 10 y 15. En invierno 39 de los 82 casos corresponden al rango entre 10 y 15 km. Por último, 36 de los 87 casos registrados en primavera corresponden al rango entre 10 y 15 km.

Capítulo 5

Discusión

Existe una amplia literatura para el MIC, dentro de la cual se ha configurado un esquema de circulación de masas de agua que, de forma simplificada, se puede describir como una capa superficial de un grosor de ~ 50 m de profundidad y con agua fresca (AE) con dirección sur desde el seno Reloncaví hasta la Boca del Guafo y una capa profunda con agua ASAA en dirección norte, proveniente de la Boca del Guafo hasta el seno Reloncaví. Este esquema no considera la existencia de un remolino en el golfo de Ancud; debido a que este remolino no ha sido descrito aún en la literatura científica.

Como se observó en la sección de resultados, en verano, la zona presentó valores mayores que en invierno; donde la temperatura superficial se presentó casi homogénea. Este resultado se puede deber a las bajas temperaturas que experimenta el sur de Chile en invierno, en conjunto con el aumento de lluvias y las aguas de los ríos hace que no haya acumulación de calor en la superficie que sea transportada por el remolino.

En el caso de las velocidades de corrientes podemos ver que existe rotación de un fluido en un diámetro de ~ 30 km oara la semana de verano e invierno, en donde la diferencia entre estaciones estuvo principalmente marcada por la intensidad

de estas corrientes. Además, se ve influenciada la columna de agua completa por estas velocidades de corrientes, es decir, no respondían a la separación de dos capas como se observó en la introducción.

La vorticidad, por razones del método usado para la detección de remolinos, presentó los resultados similares a los obtenidos finalmente. El análisis de estos datos se vio reforzado con los resultados obtenidos de la velocidad de corriente, los cuales permitieron observar que el patrón de movimiento circular del fluido en la zona existía a pesar de la baja vorticidad que presentaba; planteándonos así la posibilidad de que la energía del remolino tenga una variabilidad estacional y su energía sea variable.

Los resultados de la identificación mostraron una que la zona de generación del remolino se concentra en mayor medida en un rango de coordenadas que van desde $-76,06^{\circ}\text{E}$ hasta $-72,98^{\circ}\text{E}$ longitudinalmente y $-42,06^{\circ}\text{N}$ hasta $-42,1^{\circ}\text{N}$ latitudinalmente. Esto ocurre en un rango de acción total del remolino de 14.87 km longitudinales y 16.7 km latitudinales.

El número de días que presentaron remolinos fueron 633 de 703 días analizados, es decir, se encontró remolinos en el 90.4 % de los días que se evaluó. El 2018 contó con 338 días con remolinos de los 365 días evaluados; un 92.6 % de días con remolinos. Mientras que el 2019 contó con 295 días con remolinos de un total de 342 días evaluados; un 86.3 % de días con remolinos.

En cuanto a la distribución de diámetros, los principales rangos corresponden a los que van desde los 10 km hasta los 25 km de diámetro; estos tres acaparan el 83.4 % de los remolinos observados. El rango con más casos en el 2018 fue el que va desde los 20 hasta 25 km; con un 21.6 % del total de los datos solo ese año y un 29.4 % para los casos totales de es rango de diámetros sobre los casos totales de días con remolino. El 2019 el rango que predominó fue el que va entre 10 y 15 km con un 20.9 % de los casos sobre los casos anuales; el total de días con remolinos

entre los 10 y 15 km sobre los casos totales fue de un 33.3 %. Mientras que el rango entre 15 y 20 km representó el 20.7 % del total de los días con remolinos.

A nivel estacional los números de casos se mantuvieron relativamente similares, salvo el caso del verano, que pasó de contar 84 eventos el 2018 a contar 40 el 2019; obteniendo así 124 eventos. El otoño contó 169 casos; 83 el 2018 y 86 el 2019. El invierno contó con 166 días con remolinos; 84 el 2018 y 82 el 2019. Finalmente en la primavera hubo 174 días con remolinos; 87 en cada año.

De esos 124 casos observados en el verano 87 son de un diámetro que oscila entre los 20 y los 25 km, es decir, el 70.2 %. El caso del otoño, su rango con mayor presencias es el que va desde los 10 hasta los 15 km; con 57 casos representa el 33.7 % de los casos, un caso por encima del rango entre los 20 y 25 km el 33.1 %. En invierno 79 de los 166 casos corresponden al menor rango; representando el 47.6 % de los casos de esta estación. En primavera vuelve a predominar el rango de menores diámetros; representando el 43.1 % de los eventos primaverales.

Capítulo 6

Conclusión

En base a lo expuesto en este trabajo podemos asegurar que existe un remolino presente en el golfo de Ancud. Esto se logró calculando los gradientes de temperatura superficial de la zona, visualizando el comportamiento de las velocidades de corrientes a través de secciones verticales, calculando la vorticidad superficial y a través del método Okubo-Weiss.

En este trabajo se cuantificó el número de eventos diarios observados en un período de 742 días entre 2018 y 2019. Se observó su variabilidad estacional, su dimensión, las coordenadas donde se genera su centro y la profundidad que posee. Los resultados permitieron observar que, se trata de un remolino permanente, de dimensión variable dentro del orden de los 10 y 40 km. Este fenómeno posee una estacionalidad, observando remolinos con mayor dimensión promedio en verano. Sin embargo, la generación de este remolino no está sujeta a la estacionalidad y queda pendiente un estudio que profundice más en la dinámica de la zona que de más luces del proceso de generación de éste.

Como trabajo a futuro a desarrollar respecto a este fenómeno, está estudiar la dinámica de la zona para determinar su generación. También se debe estudiar el efecto de este remolino sobre las partículas de agua, tanto con modelación de

partículas como mediante datos in situ. Se debe evaluar el impacto biológico que causa este remolino, tanto retención de elementos como en su efecto sobre las clinas. También resulta interesante ampliar los datos, usar datos satelitales en un período de tiempo más largo y con otro métodos de detección; buscando poder evaluar con mayor precisión la frecuencia del fenómeno, la efectividad del método utilizado y analizar qué sucedió en el verano del 2019.

Capítulo 7

Bibliografía

Andrade B, J. (1985). Aspectos morfosedimentológicos de marismas y estuarios del Golfo de Ancud, Chile. In Congrès international de géographie. 25 (pp. 110-124).

Arakawa, A., & Lamb, V. R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. General circulation models of the atmosphere, 17(Supplement C), 173-265.

Araya-Vergara, J. F., Vieira, R., Suarez, M. (2008). El sistema submarino Reloncaví (Norpatagonia): Análisis morfoacústico, batimétrico y manto sedimentario reciente. Ciencia y Tecnología del Mar, 31(2), 5-27.

Artal, O., Pizarro, O., Sepúlveda, H. H. (2019). The impact of spring-neap tidal-stream cycles in tidal energy assessments in the Chilean Inland Sea. Renewable Energy, 139, 496-506.

Caceres, M., Valle-Levinson, A., & Atkinson, L. (2003). Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel. Journal of Geophysical Research: Oceans, 108(C4).

Castro, L., Soto, S., Llanos, A., Pérez, I., Cubillos, L., Alarcón, R., ... & Barrientos, P. (2015). Identificación de zonas de desove y estadios tempranos de pelágicos

pequeños en aguas interiores de la X y XI Regiones. Technical Report FIP 2013-17.

Chaigneau, A., Gizolme, A., & Grados, C. (2008). Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 106-119.

Chelton, D. B., Schlax, M. G., & Samelson, R. M. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*, 91(2), 167-216.

Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M., & de Szoeke, R. A. (2007). Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15).

Cáceres, M., A. Valle-Levinson, M. Bello, J. Belmas & M. Castillo. 2005. Vorticidad y mareas internas en dos zonas de intercambio en el golfo de Ancud. Libro de Informes Preliminares, pág. 15-26. Taller sobre los resultados del Crucero Cimar 10 Fiordos. Valparaíso.

Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., & Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1-21.

Debreu, L., Vouland, C., & Blayo, E. (2008). AGRIF: Adaptive grid refinement in Fortran. *Computers Geosciences*, 34(1), 8-13.

Dong, C., Liu, Y., Lumpkin, R., Lankhorst, M., Chen, D., McWilliams, J. C., & Guan, Y. (2011). A scheme to identify loops from trajectories of oceanic surface drifters: An application in the Kuroshio Extension region. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(9), 1167-1176.

Dufois, F. (2008). Modélisation du transport particulaire dans le Golfe du Lion en vue d'une application au devenir des traceurs radioactifs issus du Rhône (Doctoral dissertation, Université du Sud Toulon-Var).

Egbert, G. D., Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 19(2), 183-204.

Elhmaïdi, D., Provenzale, A., & Babiano, A. (1993). Elementary topology of two-dimensional turbulence from a Lagrangian viewpoint and single-particle dispersion. *Journal of Fluid Mechanics*, 257, 533-558.

González-Carrasco, J. & Díaz-Naveaz, J., 2012. Análisis morfológico, estructural y sedimentario de la cuenca del golfo de Ancud ($42^{\circ}S$; $73^{\circ}W$) mediante el uso de batimetría multihaz y reflexión sísmica de alta resolución. Santiago: Instituto Nacional de Hidráulica (INH).

Halo, I., Backeberg, B., Penven, P., Ansorge, I., Reason, C., & Ullgren, J. E. (2014). Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100, 38-53.

Iriarte, J. L., González, H. E., & Nahuelhual, L. (2010). Patagonian fjord ecosystems in southern Chile as a highly vulnerable region: problems and needs. *Ambio*, 39(7), 463-466.

Isern-Fontanet, J., García-Ladona, E., & Font, J. (2003). Identification of marine eddies from altimetric maps. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(5), 772-778.

Jeong, J., & Hussain, F. (1995). On the identification of a vortex. *Journal of fluid mechanics*, 285, 69-94.

Lara, C., Saldías, G. S., Tapia, F. J., Iriarte, J. L., & Broitman, B. R. (2016). Interannual variability in temporal patterns of Chlorophyll-a and their potential influence on the supply of mussel larvae to inner waters in northern Patagonia ($41-44^{\circ}S$). *Journal of Marine Systems*, 155, 11-18.

Lara, C., Saldías, G. S., Tapia, F. J., Iriarte, J. L., & Broitman, B. R. (2016). Interannual variability in temporal patterns of Chlorophyll-a and their potential influence on the supply of mussel larvae to inner waters in northern Patagonia

(41–44 S). *Journal of Marine Systems*, 155, 11-18.

Lazure, P., & Dumas, F. (2008). An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in water resources*, 31(2), 233-250.

Letelier, J., Soto-Mardones, L., Salinas, S., Osuna, P., López, D., Sepúlveda, H. H., Pinilla, E., & Rodrigo, C. (2011). Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región norte de los fiordos Patagónicos de Chile. *Revista de biología marina y oceanografía*, 46(3), 363-377

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14415-14428.

Nencioli, F., Dong, C., Dickey, T., Washburn, L., & McWilliams, J. C. (2010). A vector geometry–based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 27(3), 564-579.

Okubo, A. (1970, June). Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. In *Deep sea research and oceanographic abstracts* (Vol. 17, No. 3, pp. 445-454). Elsevier.

Pasquero, C., Provenzale, A., & Babiano, A. (2001). Parameterization of dispersion in two-dimensional turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 439, 279.

Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., & McWilliams, J. C. (2006). Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system. *Ocean Modelling*, 12(1-2), 157-187.

Provenzale, A. (1999). Transport by coherent barotropic vortices. *Annual review*

of fluid mechanics, 31(1), 55-93.

Rodrigo C. 2006. Topografía submarina en canales de la Patagonia norte. En: N Silva & S Palma (eds). Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a Cabo de Hornos, pp. 19-23. Comité Oceanográfico Nacional, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.

Ruiz, C., Artal, O., Pinilla, E., & Sepúlveda, H. H. (2021). Stratification and mixing in the Chilean Inland Sea using an operational model. *Ocean Modelling*, 158, 101750.

Sadarjoen, I. A., & Post, F. H. (2000). Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry. *Computers & Graphics*, 24(3), 333-341.

Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2003). A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C3).

Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean modelling*, 9(4), 347-404.

Sievers, H. A., & Silva, N. (2006). 4.1 Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. Silva, N., Palma, S.(Eds.), Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional—Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 53-58.

Sievers, H. A., C. Calvete & N. Silva. 2002. Distribución de características físicas, masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR Fiordo 2), Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 25(2): 17-43.

Sievers, H., & Prado, R. (1994). Contraste de las características oceanográficas

del seno Aysén, Chile, entre invierno y verano (Lat. 45 20'S). *Rev. Biol. Mar., Valparaíso*, 29(2), 167-209.

Silva, N., Calvete, C., & Sievers, H. (1998). Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y Laguna San Rafael, Chile (Crucero Cimar-Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21, 17-48.

Silva, N., Sievers, H. A., & Prado, R. (1995). Características oceanográficas y una proposición de circulación, para algunos canales australes de Chile entre 41 20'S y 46 40'S. *revista de Biología Marina*, 30(2), 207-254.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF version 2. National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.

Tessier, C. (2006). Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: l'exemple de la région marine Bretagne Sud (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux 1).

Weiss, J. (1991). The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 48(2-3), 273-294.

Capítulo 8

Anexo

8.1. Datos 2019

A continuación se presentarán los datos presentados en los resultados, para las mismas semanas, en el año 2019.

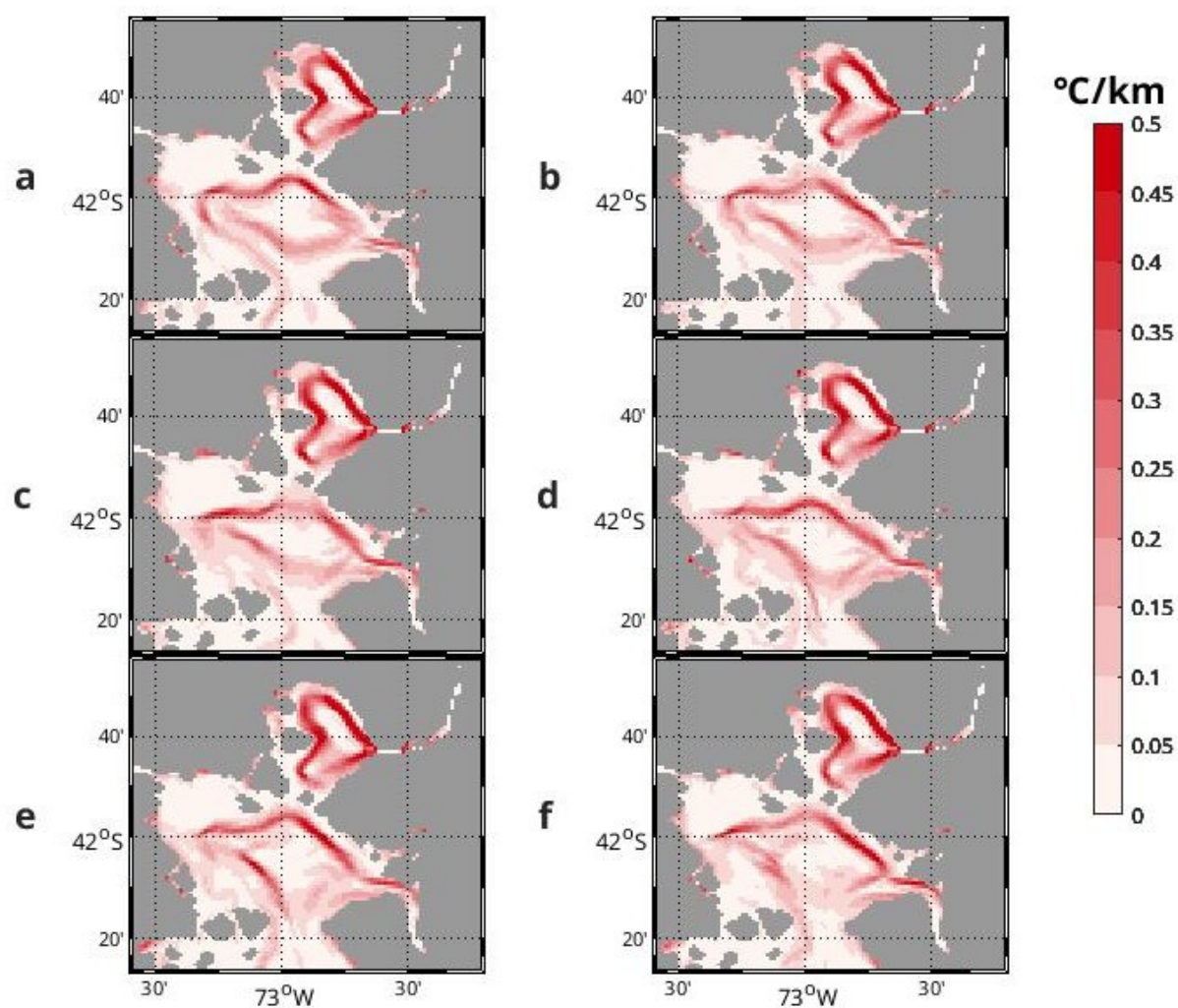


Figura 8.1.1: Gradientes de temperatura superficial durante el 1 al 6 de febrero del año 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).

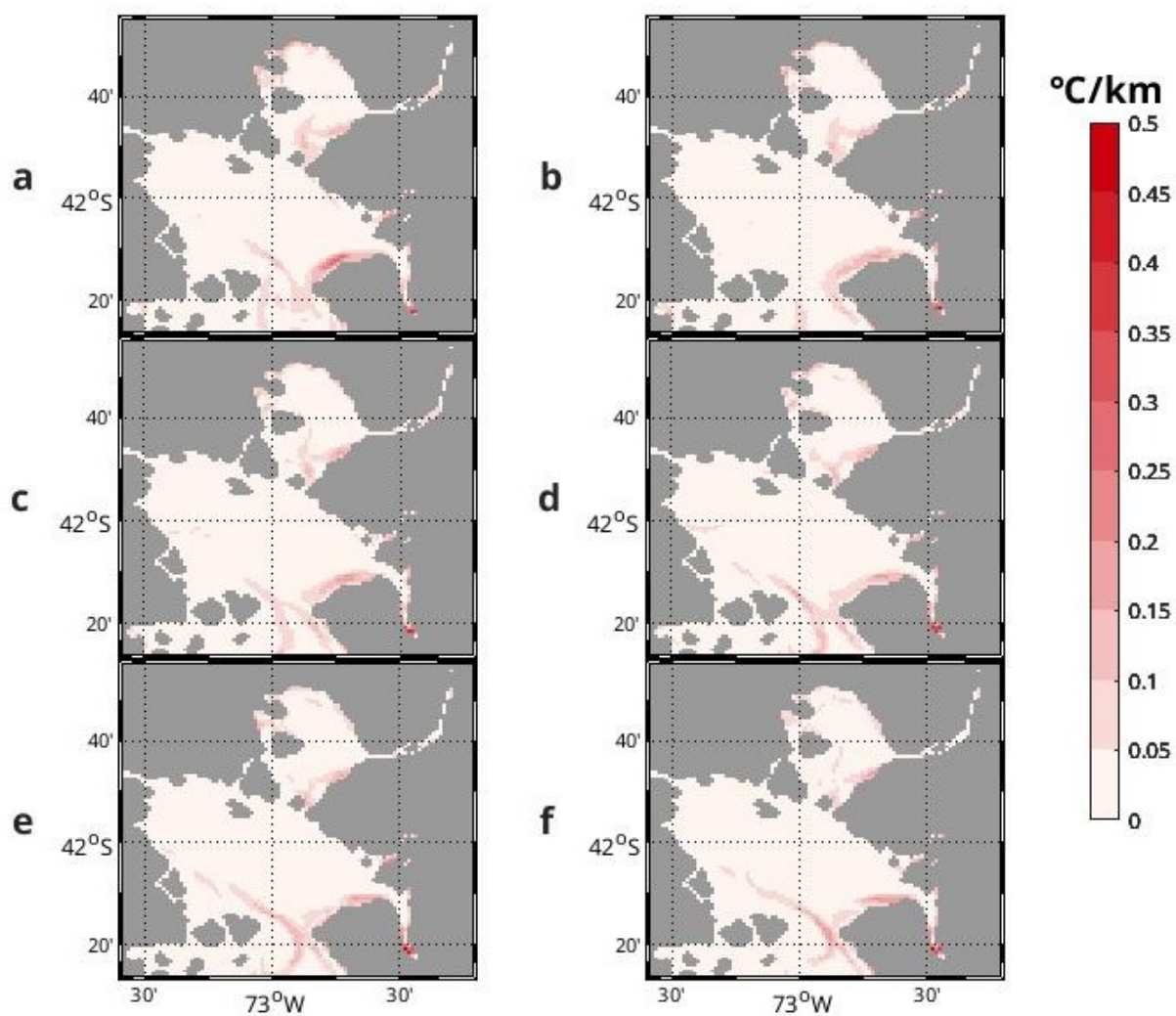


Figura 8.1.2: Gradientes de temperatura superficial durante el 3 al 8 de agosto del año 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).

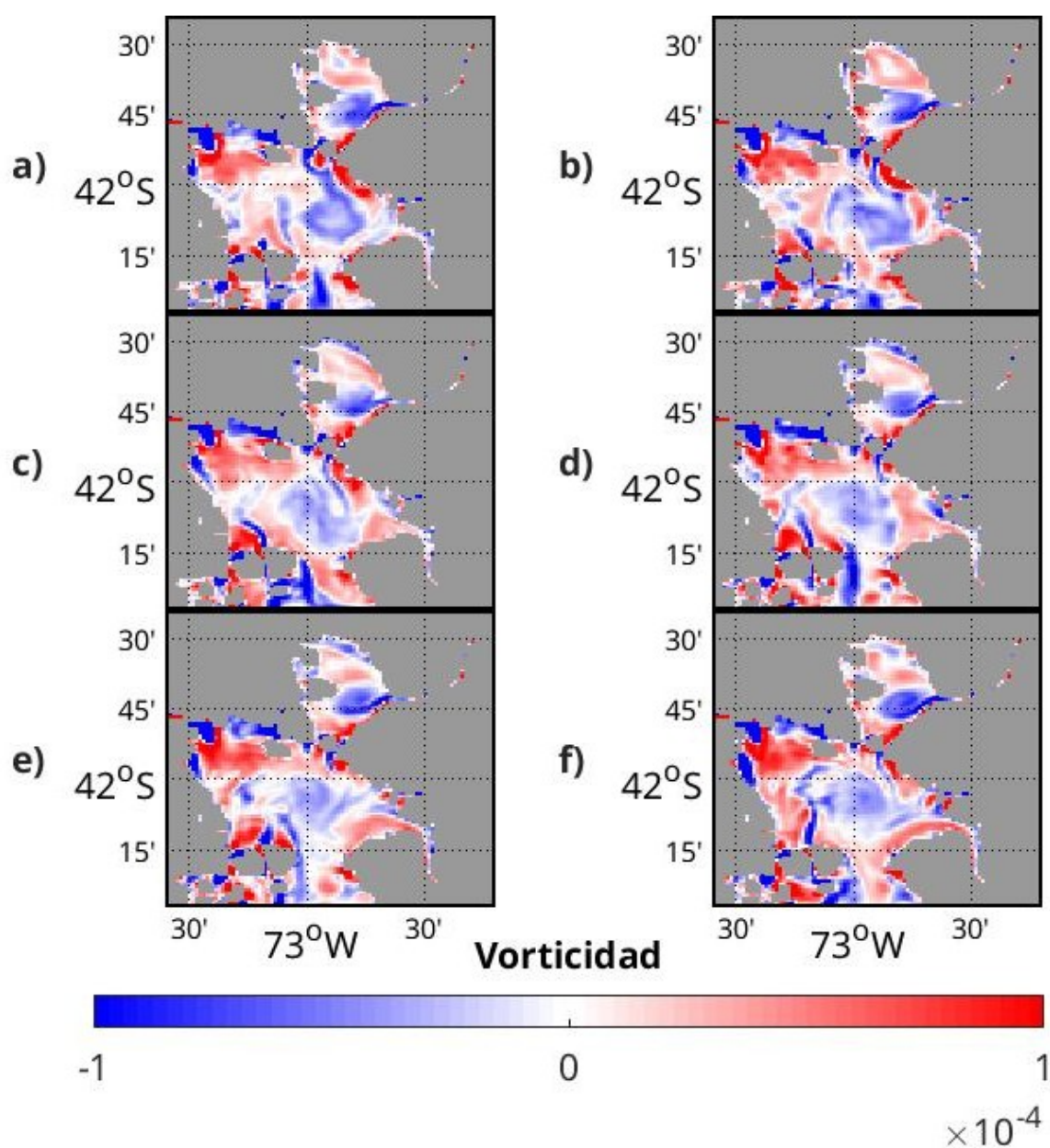


Figura 8.1.3: Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 1 y el 6 de febrero del 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).

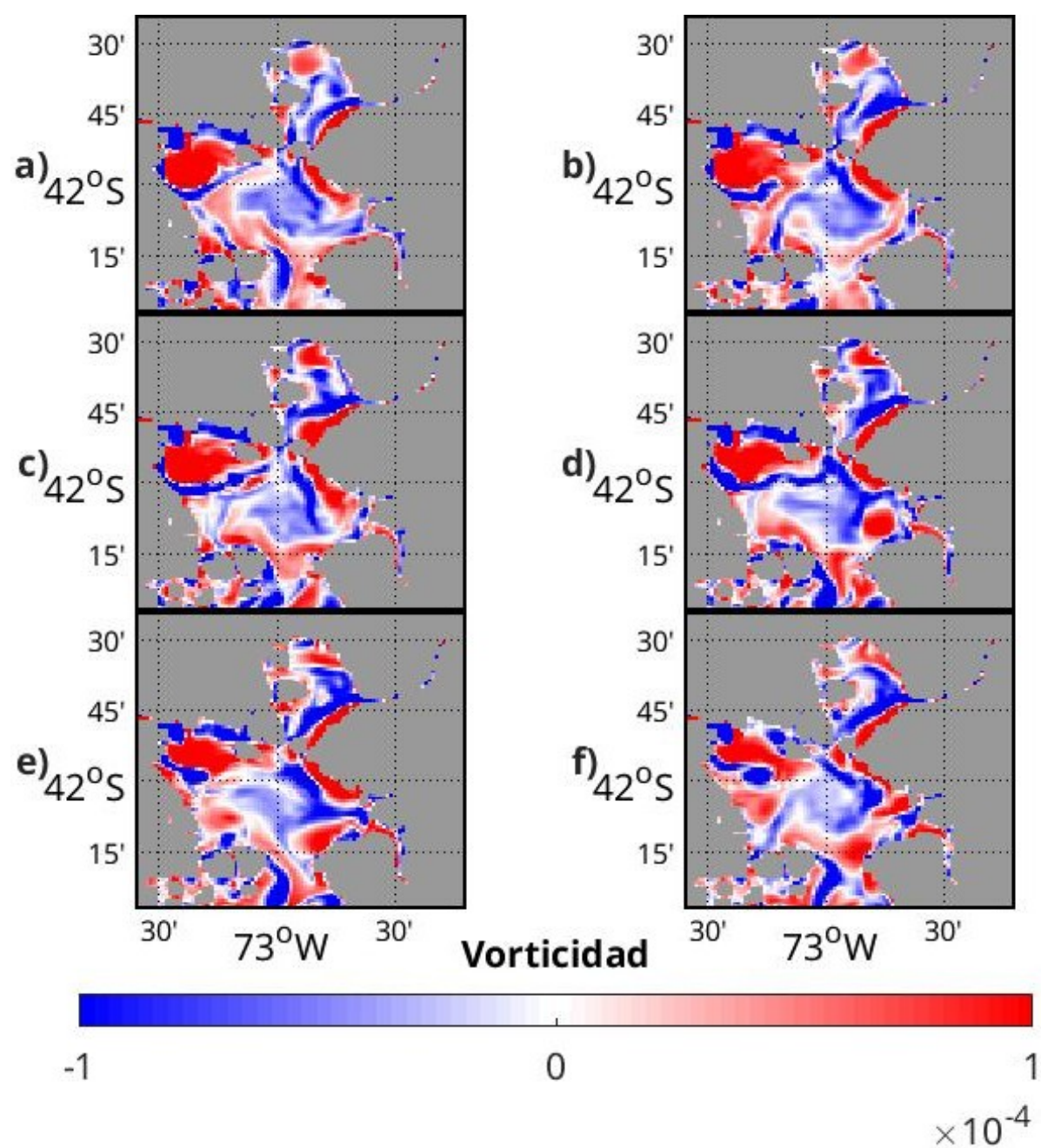


Figura 8.1.4: Vorticidad superficial para el período comprendido entre el 3 y el 8 de agosto del 2019. Ordenado desde la a) hasta la f).

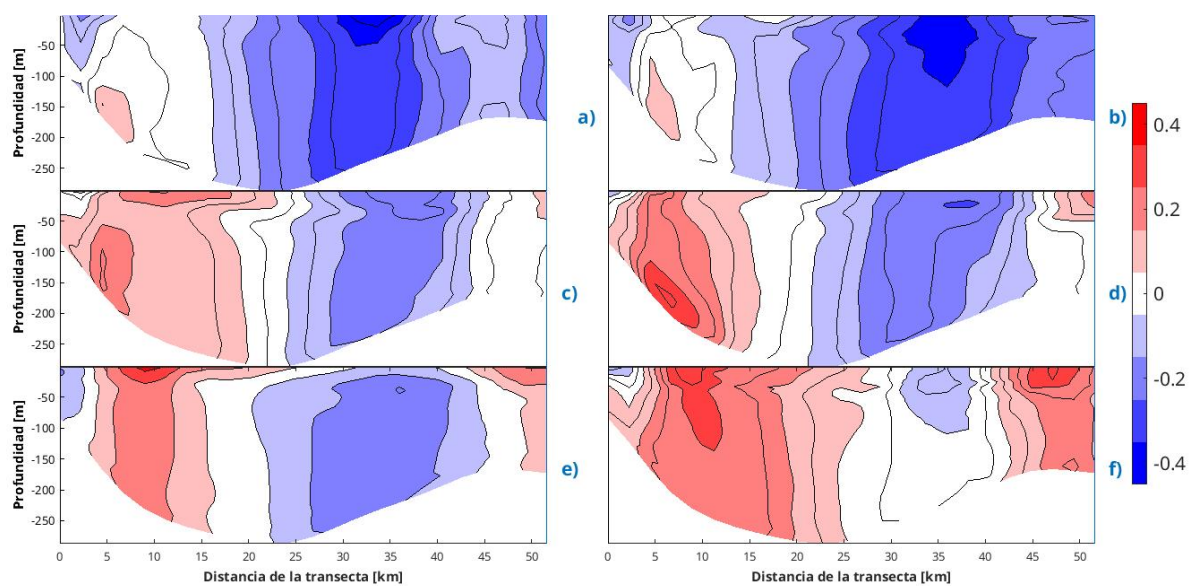


Figura 8.1.5: Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 1 al 6 de febrero del 2019. Ordenadas desde la a) hasta la f).

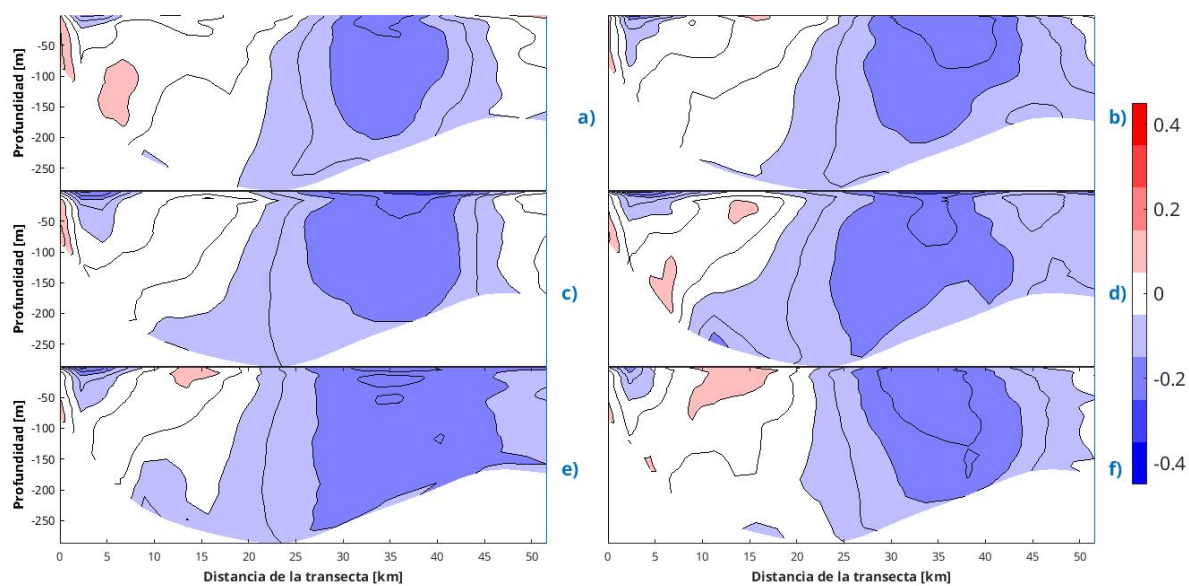


Figura 8.1.6: Sección vertical de velocidades de corriente zonales para el período del 3 al 8 de agosto del 2019. Ordenadas desde la a) hasta la f).

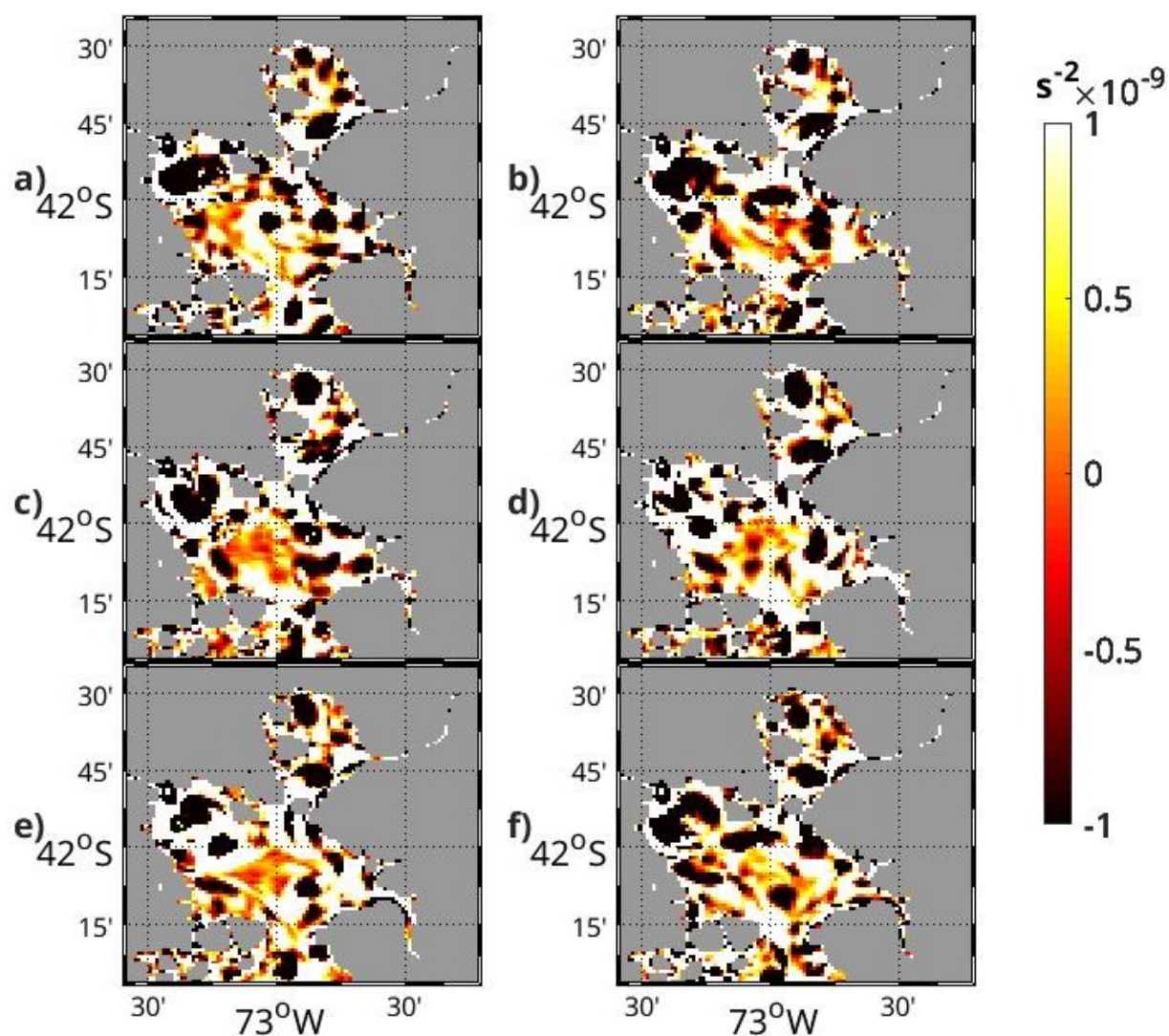


Figura 8.1.7: Valores diarios de OW estivales del año 2019. Correspondiente al período entre el 1 y 6 de febrero; ordenados de la a) hasta la f).

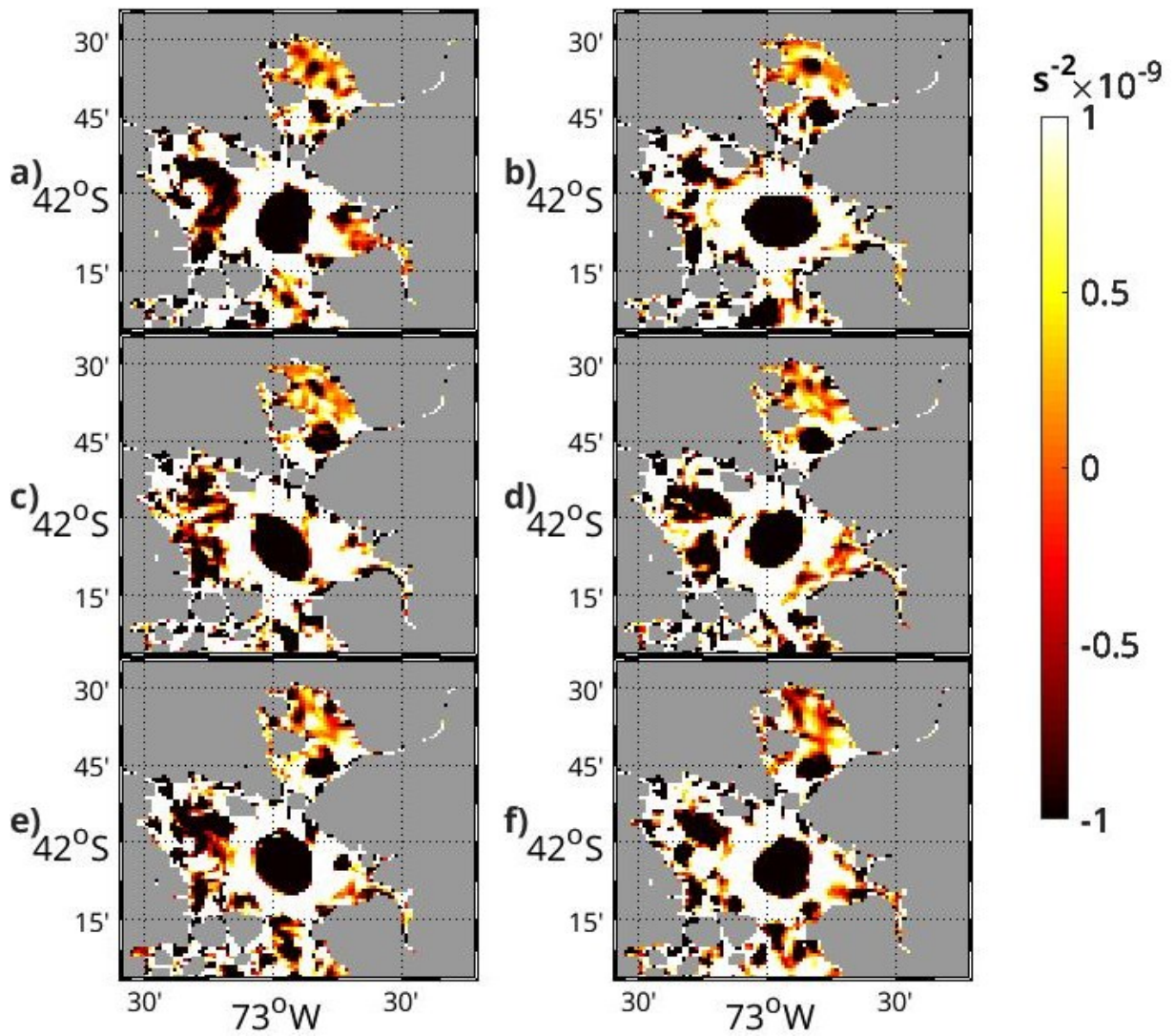


Figura 8.1.8: Valores diarios de OW invernales del 2019. Correspondiente al período entre el 3 y 8 de agosto; ordenados de la a) hasta la f).