

Universidad de Concepción  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Geofísica



**Impacto de los remolinos de mesoescala y de la migración vertical sobre la distribución espacial y el crecimiento de larvas planctónicas en la Dorsal de Juan Fernández: Estudio de casos basado en modelación biofísica.**

Maria Carolina Medel Peranchiguay

Habilitación Profesional  
para optar al Título de Geofísico

Marzo 2016

Universidad de Concepción  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Geofísica

**Impacto de los remolinos de mesoescala y de la migración vertical sobre la distribución espacial y el crecimiento de larvas planctónicas en la Dorsal de Juan Fernández: Estudio de casos basado en modelación biofísica.**

Maria Carolina Medel Peranchiguay

Habilitación Profesional  
para optar al Título de Geofísico

Profesor Guía:  
Dra. Carolina Parada

Comisión:  
Dr. Oscar Pizarro, Dr. Andrés Sepúlveda, Dra. Carmen Morales



Marzo 2016

---

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a la Dra. Carolina Parada por su infinita paciencia para enseñarme el ambiente biológico marino, por su apoyo y constante preocupación. Al Instituto Milenio de Oceanografía (IMO) por brindarme su apoyo y confianza a través de un beca de mantención para llevar a cabo esta habilitación profesional y por último, pero no menos importante, a mi madre.

---

# Resumen

Los remolinos de mesoscala al interactuar con las islas oceánicas y montes submarinos de la dorsal de Juan Fernández (DJF; 33°40' S, 78°40' W) pueden modular la circulación local y por ende la distribución de los primeros estadios de vida de especies pelágicas. A través de la implementación de un modelo biofísico, que acopla las salidas de un modelo hidrodinámico regional de la DJF y un modelo basado en individuos, se aborda el estudio del impacto acoplado, de los remolinos de mesoscala y la migración vertical en el plancton, en la distribución y crecimiento de estadios larvales planctónicos en la región de la DJF. Para este propósito se identificaron remolinos de mesoscala ciclónicos y anticiclónicos superficiales mediante métodos de detección automatizada utilizando un algoritmo híbrido. Además, se exploró la identificación de remolinos subsuperficiales basada en un índice compuesto que involucra diferencias entre profundidades de isotermas, vorticidad relativa y salinidad. Se seleccionaron dos casos de estudio de remolinos de mesoscala que potencialmente podrían generar un impacto en la distribución de los estadios larvales planctónicos de especies pelágicas que habitan la DJF. Estos casos incluyeron: (a) dos remolinos ciclónicos superficiales y un remolino anticiclónico superficial detectados en 2002, (b) un remolino ciclónico superficial y un remolino anticiclónico subsuperficial detectados en 2005. Bajo estos escenarios se realizaron dos experimentos de migración vertical (superficial y profunda) y un estudio control (sin migración vertical) para evaluar el efecto en la distribución y crecimiento de larvas planctónicas virtuales. Los resultados indicaron que los remolinos de mesoscala no juegan un papel importante en la distribución de larvas planctónicas en la DJF, dado que la mayor agregación de estos organismos (partículas) no estuvo relacionada a estas estructuras sino a otras estructuras de mesoscala como estelas y a remolinos de submesoscala. En ambos casos de estudio se observaron patrones similares para los tres experimentos: (1) la migración vertical en las especies pelágicas aporta a la mayor retención de partículas dentro del sistema de la DJF, ya que esta estrategia biológica se acopla mejor a las estructuras de mesoscala y submesoscala, mientras que (2) el experimento de las partículas con comportamiento pasivo muestra mayor dispersión, menor acoplamiento a las estructuras que interactúan con la DJF

y menores porcentajes de partículas que quedan en el sistema. La migración vertical se presentó como un mecanismo biológico importante que acoplado con las estructuras de mesoscala como estelas y remolinos de submesoscala contribuyen a aumentar los porcentajes de partículas que permanecen en el sistema de la DJF. Por otra parte, el crecimiento de los organismos simulados, asociados a distintas condiciones experimentales, fue explorado mediante un proxy denominado grados por día, que corresponde a la diferencia acumulativa de temperatura experimentada durante el día por el organismo respecto de un valor de referencia. Los organismos simulados que desarrollan migración vertical superficial presentaron valores positivos del índice y condiciones de crecimiento más favorables comparado con aquellos con migraciones a niveles más profundos. Los remolinos de mesoscala ofrecen las mejores condiciones para el crecimiento. En concreto, el acoplamiento entre la migración vertical de especies pelágicas y los remolinos de mesoscala no contribuyen a aumentar la retención de organismos en la DJF, pero si impactan significativamente el crecimiento de larvas planctónicas en este sistema.

---

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>12</b>
<b>2. Objetivos e Hipótesis</b>	<b>17</b>
2.1. Objetivos . . . . .	17
2.2. Hipótesis . . . . .	18
<b>3. Metodología</b>	<b>19</b>
3.1. Modelo Hidrodinámico . . . . .	19
3.2. Detección Automatizada de Remolinos Superficiales . . . . .	20
3.3. Detección Remolinos Subsuperficiales . . . . .	25
3.4. Modelo Basado en Individuos (IBM) . . . . .	27
<b>4. Resultados y Discusión</b>	<b>31</b>
4.1. Remolinos superficiales de mesoscala . . . . .	31
4.2. Remolinos Subsuperficiales . . . . .	41
4.3. Modelo Basado en Individuos (IBM) . . . . .	52
<b>5. Conclusiones</b>	<b>66</b>

---

# Índice de figuras

1.1.	Montes submarinos que componen la dorsal de Juan Fernández. El panel derecho indica la ubicación geográfica de la dorsal, mientras que los paneles superiores muestran las islas Alejandro Selkrik, Robinson Crusoe y Santa Clara, que corresponden a los montes emergidos de la dorsal. Figura tomada de Ernst et al., (2013). . . . .	15
3.2.	Batimetría del modelo ROMS. Dominio del modelo padre ( $\sim 4$ km) que contempla parte de la costa chilena y dominio del modelo hijo ( $\sim 1$ km) que abarca la dorsal de Juan Fernández. . . . .	21
3.3.	Resultado final de identificación y selección del algoritmo de detección automatizado de remolinos desarrollado por Halo et al., (2014) utilizado en el Canal de Mozambique. Colores rojos corresponden a anticiclones y los colores azules a ciclones. Figura extraída de Halo et al., (2014). . . .	23
3.4.	Ejemplo de la deformación de las isotermas en presencia de un remolino subsuperficial anticiclónico en las proximidades de la DJF el 6 de noviembre del 2004, información obtenida del modelo hijo de ROMS. Las isotermas adoptan una forma de lente, deformándose en forma convexa las isotermas superiores como muestra la isoterma de $12^{\circ}\text{C}$ y en forma cóncava las isotermas inferiores como muestra la isoterma de $8^{\circ}\text{C}$ . . . .	26
3.5.	Grilla hijo dividida en 221 áreas, las áreas color negra corresponden al subsistema S1 y S2, las áreas color azul y verde corresponden al subsistema S3 y S4 respectivamente. . . . .	30
4.6.	Distribución espacial de los remolinos de mesoscala entre las latitudes $27^{\circ}\text{S}$ y $37^{\circ}\text{S}$ , desde la costa hasta los $83^{\circ}\text{W}$ . Los colores representan la cantidad de remolinos detectados por punto de grilla durante el período 2001-2008. . . . .	33
4.7.	Variabilidad temporal de la cantidad de remolinos detectados por año en (a) la grilla padre y en (b) la DJF. La línea negra corresponde a la cantidad total de remolinos, la línea roja corresponde a la cantidad de Ra y la línea azul a la cantidad de Rc. . . . .	34

4.8. Variabilidad espacial de la cantidad de remolinos detectados por año para el período 2001-2008. Los recuadros negros definen la DJF. . . . .	35
4.9. Distribución espacial de la polaridad media de los remolinos por punto de grilla para los 8 años de simulación (2001-2008). Los valores negativos corresponden a una predominancia ciclónica, mientras que los valores positivos a anticiclónica. . . . .	37
4.10. Distribución del número de remolinos detectados en la grilla padre en función del radio de los remolinos (a) anticiclónicos y (b) ciclónicos. . .	38
4.11. Distribución del número de remolinos, que interactúan con la DJF, en función del radio de remolinos (a) anticiclónicos y (b) ciclónicos. . . .	38
4.12. Distribución espacial del radio promedio de los remolinos para los 8 años de simulación . . . . .	39
4.13. Trayectorias de los remolinos ciclónicos (izquierda) y anticiclónicos (derecha) para el período 2001-2008. . . . .	40
4.14. Espectros de varianza fraccional local de $P_8$ (arriba), $P_{11}$ (medio) y $\Delta P_t$ (abajo) con niveles de confianza de 50 %, 80 %, 90 %, 95 %, 99 %. . . .	43
4.15. Pruebas de sensibilidad del umbral para $\Delta P_t$ , con umbrales $>180$ m (izquierda), $>190$ m (centro) y $>200$ m (derecha). Las líneas negras corresponden a las transectas T1 y T2. . . . .	44
4.16. Perfil vertical de vorticidad relativa en la transecta T1. Los colores cálidos estan asociados a remolinos anticiclónicos, mientras los colores fríos a los ciclónicos. Los colores más intensos corresponden al núcleo de los remolinos, el anticiclón al estar siendo deformado no presenta un núcleo uniforme. Los umbrales del índice isotermal (lineas verticales negras) delimitan los bordes horizontales de los remolinos anticiclónicos subsuperficiales detectados por el índice. Las curvas negras indican las isotermas ( $^{\circ}\text{C}$ ). . . . .	45
4.17. Similar a 4.16 pero para la transecta T2. . . . .	46
4.18. Comparación entre estructuras detectadas con el umbral de $\Delta P_t >200$ m (arriba) y vorticidad relativa promediada entre los 150 y 400 m de profundidad (abajo) para febrero del 2005. Los colores rojos están asociados a Ra. . . . .	47
4.19. Comparación entre estructuras detectadas con el umbral de $\Delta P_t >200$ m (arriba) y el campo de salinidad promediada entre los 150 y 400 m de profundidad (abajo) para febrero del 2005. Los colores más cálidos están asociados a Ra. . . . .	48

4.20. Mapa de vorticidad relativa que representa los remolinos estudiados del Caso 1 correspondiente al mes de octubre del 2002: Ciclón 1, Ciclón 2 y Anticiclón. . . . .	50
4.21. Mapa de vorticidad relativa que representa los remolinos estudiados del Caso 2 correspondiente al mes de enero del 2005: Ciclón y Anticiclón. . . . .	50
4.22. Perfiles verticales de vorticidad asociados a los remolinos Ciclón 1 (izquierda), Ciclón 2 (centro) y anticiclónico (derecha) del caso 2002. Los colores representan la vorticidad relativa. . . . .	51
4.23. Perfiles verticales de vorticidad asociados a los remolinos ciclónico (izquierda) y anticiclónico subsuperficial (derecha) caso 2005. Los colores representan la vorticidad relativa. . . . .	51
4.24. Patrones de distribución transcurridos 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) días de simulación, la primera columna corresponde al experimento MNS, la segunda columna el experimento MNP y la tercera columna el CP. Los colores indican el porcentaje de partículas en función de la cantidad total lanzadas (29.000), pero descontando las partículas muertas y las que salen del sistema de la DJF. . . . .	53
4.25. Mapas de contornos de vorticidad relativa (izquierda) y EKE (derecha) en los días 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) del caso 2002. Se indican los remolinos estudiados. . . . .	55
4.26. Patrones de distribución del caso 2005 transcurridos 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) días de simulación, la primera columna corresponde a la distribución del experimento MNS, la segunda columna representa la distribución del experimento MNP y la tercera columna, el experimento CP. Los colores indican el porcentaje de partículas en función de la cantidad total lanzadas (29.000), pero descontando las partículas muertas y las que salen del sistema de la DJF. . . . .	57
4.27. Mapas de contornos de vorticidad relativa (izquierda) y EKE (derecha) en los días 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) de simulación del caso 2005. Se indican los remolinos estudiados. . . . .	58
4.28. Distribución vertical de las partículas en los remolinos del caso 2002 para los experimentos con migración diurna nictimeral superficial MNS (MNS; izquierda), migración diurna nictimeral profunda (MNP; centro) y comportamiento pasivo (CP; derecha). . . . .	60

- 
- 4.29. Distribución vertical media de las partículas en los remolinos del caso 2005 para los experimentos con migración diurna nictimeral superficial (MNS; izquierda), migración diurna nictimeral profunda (MNP; centro) y comportamiento pasivo (CP; derecha). . . . . 61
- 4.30. GD acumulados por día en un mes para las partículas en las zonas con mayor agregación para el caso 2002 (mes de octubre; primera columna) y 2005 (mes de enero; segunda columna) para los experimentos de migración diurna nictimeral superficial (MNS; primera fila), migración diurna nictimeral profunda (MNP; segunda fila) y comportamiento pasivo (CP; tercera fila). . . . . 65

---

# Índice de Tablas

4.1. Número de remolinos detectados con algoritmo de Halo et al., (2014). . . . .	32
4.2. GD de las partículas dentro de los remolinos, con $T_0 = 14^\circ\text{C}$ para 2002 (A: Anticiclón; C1: Ciclón 1; C2: Ciclón 2) y $T_0 = 16^\circ$ en 2005 ( $A_s$ : Anticiclón subsuperficial; C: Ciclón) en los experimentos MNS, MNP y CP. La X indica que no hay partículas en el remolino. . . . .	64
4.3. GD de las partículas dentro de los remolinos, con $T_0 = 15^\circ\text{C}$ para 2002 (A: Anticiclón; C1: Ciclón 1; C2: Ciclón 2) y 2005 ( $A_s$ : Anticiclón subsuperficial; C: Ciclón) en los experimentos MNS, MNP y CP. La X indica que no hay partículas en el remolino. . . . .	64
4.4. GD de las partículas dentro de los remolinos, con $T_0 = 13^\circ\text{C}$ para 2002 (A: Anticiclón; C1: Ciclón 1; C2: Ciclón 2) y 2005 ( $A_s$ : Anticiclón subsuperficial; C: Ciclón) en los experimentos MNS, MNP y CP. La X indica que no hay partículas en el remolino. . . . .	64
4.5. GD de las partículas en zonas con alta agregación de partículas, con $T_0 = 14^\circ\text{C}$ para 2002 y $T_0 = 16^\circ\text{C}$ en 2005 en los experimentos MNS, MNP y CP. . . . .	64

---

# 1. Introducción

El sistema de corrientes frente a las costas de Chile y Perú, conocido como Sistema de Corrientes Perú-Chile o de Humboldt se localiza en una de las regiones más productivas del mundo (Halpin et al., 2004). La zona central de Chile se caracteriza por un frente de surgencia, con un máximo observado en verano y primavera (Chaigneau y Pizarro, 2005), que transporta Agua Ecuatorial Subsuperficial (AEES) a la superficie. En relación a la variabilidad de mesoescala, al igual que los otros grandes sistemas de surgencia de borde oriental, esta región se caracteriza por la generación de remolinos de mesoescala (Chelton et al., 2011). Estas estructuras que se originan en la costa son capaces de transportar momentum, calor y propiedades químicas desde su región de origen hacia el océano abierto (Johnson y McTaggart, 2010). En general, los remolinos son más energéticos que las corrientes circundantes y son una componente importante en la dinámica oceanográfica de la Zona de Transición Costera (ZTC). La ZTC se extiende hasta los  $\sim 600-800$  km mar adentro y se caracteriza por una alta energía cinética (EKE; Hormazábal et al., 2004; Chaigneau y Pizarro, 2005). La estructura espacial y temporal, así como las características y la propagación de los remolinos de mesoescala en el Pacífico Sur Oriental (PSO) han sido estudiadas y descritas a través de perfiles Argó (Johnson y McTaggart, 2010), derivadores (Chaigneau y Pizarro, 2005), altimetría satelital (Hormazábal et al., 2004; Chelton et al., 2007; Chaigneau et al., 2008) y modelos numéricos (Chaigneau et al., 2011; Hormazábal et al., 2013; Combes et al., 2015). En este sistema de corrientes, la generación de remolinos superficiales y subsuperficiales se asocia, principalmente, a inestabilidades baroclínicas de las corrientes costeras (Leth y Shaffer, 2001) y su modulación está fuertemente determinada por los ciclos Niño/Niña (Hormazábal et al., 2004). Estudios en el PSO indican que los

remolinos ciclónicos (giro horario) tienden a dominar la superficie aportando significativamente a la variabilidad de la altura superficial del mar (Chelton et al., 2007), mientras que los remolinos anticiclónicos (giro antihorario), que tienen una expresión débil en superficie (Gordon et al., 2009), dominan la actividad subsuperficial (Johnson y McTaggart, 2010; Colas et al., 2012). Los remolinos subsuperficiales en esta región se originarían por inestabilidades baroclínicas asociadas al cizalle vertical que introduce la Corriente Subsuperficial de Perú-Chile (Johnson y McTaggart, 2010). Esta corriente fluye predominantemente hacia el sur, a lo largo de la costa de Perú hasta el Golfo de Penas en Chile, entre los 150 m y 400 m de profundidad, con un núcleo cercano a los 220 m, transportando AESS (Silva y Neshyba, 1979). Esta masa de agua subsuperficial se caracteriza por ser relativamente cálida, tener un máximo de salinidad (34.2-34.6 psu), bajas concentraciones de oxígeno ( $< 3 \text{ ml } L^{-1}$ ) y ser rica en nutrientes (Gunther, 1936; Silva et al., 2009). Cuando los remolinos subsuperficiales se desprenden de esta corriente, transportan consigo estas características hacia el océano abierto (Hormazábal et al., 2013).

Un rasgo característico de todos los remolinos de mesoscala es su propagación hacia el oeste, con desviaciones meridionales, dependiendo del signo de su vorticidad. En teoría los remolinos anticiclones (ciclones) tienen un desplazamiento con una ligera componente norte (sur; Cushman-Roisin, 1994). Sin embargo, se ha observado que los ciclones tienen una migración más oeste que suroeste (Chaigneau y Pizarro, 2005). Los remolinos tienden a conservar las propiedades de su zona de formación por largo tiempo y grandes distancias, y frente a Chile tienen una señal que los distingue fuertemente de las aguas circundantes que son más frías, ricas en oxígeno y pobres en nutrientes (Johnson y McTaggart, 2010). A lo largo de sus trayectorias los remolinos pueden interactuar con elevaciones topográficas y tener un impacto significativo en el ecosistema (i.e. aumento del transporte vertical). En las Islas Canarias se ha observado que los remolinos subsuperficiales al interactuar con la topografía de las islas, pueden aumentar la producción de plancton y acelerar el transporte vertical de materia orgánica a la zona fótica (Sangrá et al., 2007). En el PSO los remolinos pueden jugar un rol importante en el transporte de calor (Colas et al., 2012) o extender el área de alta productividad primaria que se encuentra en el frente de surgencia a través de la advección de masas

de fitoplancton y aguas ricas en nutrientes durante su propagación (Correa-Ramirez et al., 2007). Por otro lado, podrían tener un impacto en los incrementos locales de fitoplancton asociados con la presencia de islas (efecto de masa de isla), pues se ha reportado su vinculación con aumentos de clorofila en islas oceánicas (Andrade et al., 2012).

Un conjunto de elevaciones topográficas importantes frente a las costas de Chile es la dorsal de Juan Fernández (DJF). Esta dorsal es un lineamiento asísmico de montes submarinos e islas, de una extensión total de  $\sim 800$  km de longitud (Rodrigo y Lara, 2014). Se extiende sobre  $\sim 33$  °S de latitud y entre  $\sim 82$  °W hasta  $\sim 73,85$  °W de longitud formando un área que incluye  $\sim 15$  montes submarinos de diferentes tamaños, formas y profundidades. Las únicas tierras emergentes de la DJF conforman el Archipiélago de Juan Fernández (AJF), compuesto por las Islas Robinson Crusoe y Santa Clara (RC), Alejandro Selkirk (AS) e islotes menores (Figura 1.1) que producen un entorno oceanográfico singular proporcionando condiciones favorables para la flora y fauna endémica (Arana, 2010). La influencia de los montes submarinos en las comunidades planctónicas depende de diversas variables topográficas (e.g. altura, morfología) así como de los procesos biológicos y oceanográficos que ocurren en ellos. El gran tamaño y forma de los montes submarinos de la DJF podría tener un impacto en la circulación del agua circundante, y en otros procesos físicos involucrados en este entorno, modulando procesos de transporte y sobrevivencia de estadios tempranos de especies asociados a los montes.

Los procesos físicos en el océano pueden influenciar los procesos biológicos asociados a estadios larvales, modificando la sincronización de la reproducción, el transporte larval, la conectividad y el asentamiento (Cowen, 2002). Para entender estas relaciones, se han desarrollado herramientas de modelación biofísica donde se acoplan modelos basados en individuos (Individual-based Model, IBM) con modelos hidrodinámicos. Los modelos IBM se utilizan para estudiar la historia de vida de organismos marinos en diferentes sistemas, y relacionarlos con sus condiciones ambientales y patrones de transporte que afectan etapas de vida temprana (Parada et al., 2003). Los resultados de estos modelos acoplados han proporcionado información relevante para entender el

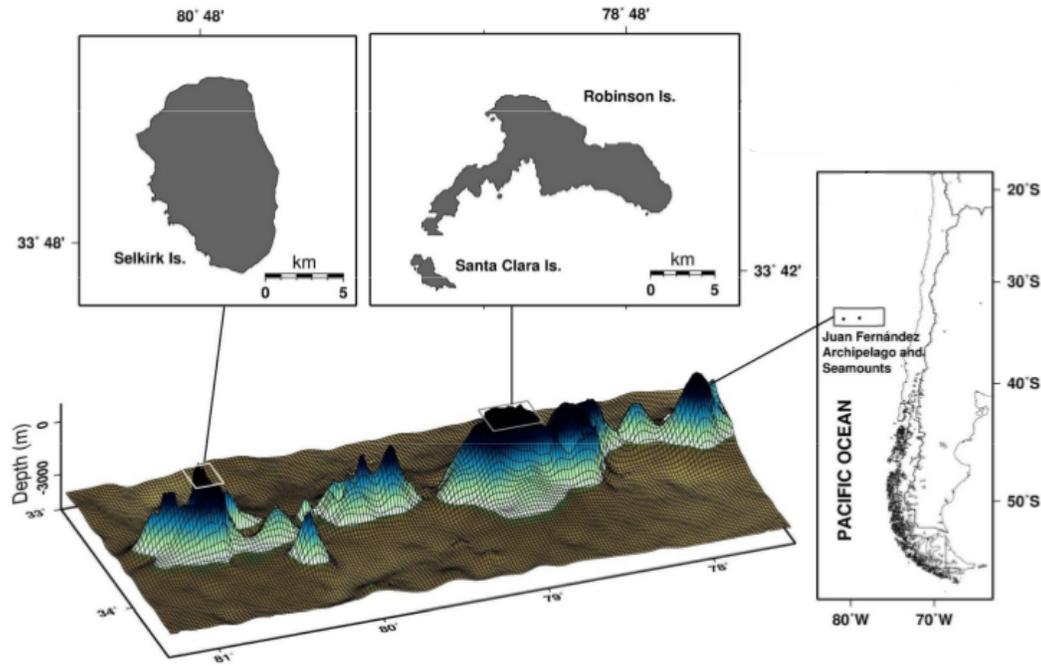


Figura 1.1: Montes submarinos que componen la dorsal de Juan Fernández. El panel derecho indica la ubicación geográfica de la dorsal, mientras que los paneles superiores muestran las islas Alejandro Selkirk, Robinson Crusoe y Santa Clara, que corresponden a los montes emergidos de la dorsal. Figura tomada de Ernst et al., (2013).

comportamiento y los patrones, tanto espaciales como temporales, de las poblaciones marinas y para medir cuantitativamente la conectividad poblacional (Cowen et al., 2000). Sin embargo, el amplio rango de comportamientos larvales y los mecanismos físicos involucrados, con su variabilidad en múltiples escalas, hacen que el transporte larval sea muy difícil de medir (Pineda et al., 2007). Los organismos marinos no son pasivos: nadan activamente, migran verticalmente, y cambian su boyantez (Cowen, 2002). La complejidad del comportamiento larval sigue sin dilucidarse para la mayoría de las poblaciones marinas (Cowen et al., 2007). Además, los esfuerzos para modelar la distribución horizontal de las poblaciones en los ecosistemas oceánicos se ha visto obstaculizado por la escasez de estimaciones empíricas. Una de las piezas de información principales de los estudios de modelación de la dinámica espacio-tiempo de estadios tempranos de organismos marinos, corresponde a las características biológicas de las especies (Cowen et al., 2006; Werner et al., 2007). Para especies de distribución insular este tipo de información es escasa y dispersa (Porobic et al., 2012).

La migración vertical es un comportamiento biológico que puede contribuir a la transferencia de material orgánico desde la zona fótica a áreas más profundas del océano. Uno de los comportamientos verticales más frecuentes en las especies epipelágicas y mesopelágicas es la migración vertical nictimeral. Este tipo de migración vertical muestra un patrón caracterizado por el ascenso de los individuos a aguas más someras durante las horas de la noche, mientras que descienden a aguas más profundas durante las horas del día.

El crecimiento de las larvas marinas depende de la temperatura y del alimento disponible (Houde y Zastrow, 1993). De hecho, la temperatura influye en todos los procesos metabólicos y es el factor más importante que determina la tasa de crecimiento (Brett, 1979). Ha sido argumentado que el crecimiento debe ser maximizado durante los primeros estadios de vida, postulando que mientras más rápido sea el crecimiento y el desarrollo de los individuos, éstos tienen más probabilidades de sobrevivencia (Hare y Cowen, 1997). Así, un crecimiento más rápido puede reducir la mortalidad en los primeros estadios larvales.

La interacción de las islas y montes submarinos de la DJF con las estructuras de mesoscala que provienen de la costa chilena ha sido poco estudiada. Aunque se ha documentado que los remolinos constituyen un importante mecanismo de conexión entre regiones costeras e islas oceánicas (Andrade et al., 2014), el impacto que pueden tener los remolinos de mesoscala junto a las estrategias de vida de los individuos como la migración vertical, en la distribución y el crecimiento de especies pelágicas en la DJF no ha sido abordado.

En este estudio se identificarán y describirán las principales características de los remolinos de mesoscala superficiales y subsuperficiales que interactúan con la DJF a partir de la información entregada por las salidas del modelo hidrodinámico de alta resolución “Regional Ocean Modeling System“ (ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005). Además se evaluará la migración vertical de especies asociadas a la DJF y su interacción con remolinos de mesoscala a través de la implementación de un IBM adaptado para la región de la DJF. Con estos resultados se evaluará cómo el impacto de los remolinos de mesoscala y la migración vertical en el plancton modulan la distribución y crecimiento de especies pelágicas en la DJF.

---

## 2. Objetivos e Hipótesis

### 2.1. Objetivos

Basándose en lo expuesto anteriormente, surgen algunas preguntas acerca de la relación de los procesos biofísicos que determinan el crecimiento y la distribución poblacional en la DJF, ¿cómo las estructuras de mesoescala, que se propagan hacia el oeste desde la costa, interactúan con la DJF y afectan la dispersión y el crecimiento de especies pelágicas? Los factores que controlan la distribución de especies en la DJF son múltiples y complejos, siendo difícil discriminar los procesos físicos relevantes y sus escalas espaciales y temporales. Así, el objetivo general de este estudio es evaluar el efecto de los remolinos de mesoescala y las interacciones con la migración vertical en el plancton de especies pelágicas en la distribución y crecimiento de estas especies en el sistema de la DJF.

#### **Objetivos específicos:**

1. Identificar los remolinos de mesocala superficiales que interactúan con la DJF a través de un algoritmo automatizado de detección.
2. Explorar un método para la detección de los remolinos subsuperficiales que interactúan con la DJF.
3. Seleccionar los casos de estudio.
4. Implementar un Modelo Basado en Individuos (IBM, por sus siglas en inglés) en donde se integren los remolinos de mesocala que interactúan con el sistema de

la DJF y la estrategia de migración vertical de especies pelágicas en sus primeros estadios larvales.

5. Realizar experimentos de simulación a través del modelo biofísico para evaluar el efecto conjunto entre los remolinos de mesoescala y diferentes estrategias de migración vertical, en la distribución y crecimiento de larvas planctónicas de la DJF.

## **2.2. Hipótesis**

Los remolinos de mesoescala y la migración vertical en el plancton modulan la distribución y el crecimiento de las especies pelágicas en la Dorsal de Juan Fernández.

---

## 3. Metodología

Para llevar a cabo el objetivo general de este estudio se diseñó una aproximación metodológica que fue dividida en las siguientes etapas: (3.1) desarrollo de un modelo hidrodinámico, (3.2) la detección automatizada de remolinos superficiales, (3.3) la detección de remolinos subsuperficiales y (3.4) la metodología de la implementación de un Modelo Basado en Individuos, donde se evalúa la interacción entre los remolinos de mesoscala y la migración vertical de organismos pelágicos en la DJF.

### 3.1. Modelo Hidrodinámico

La información que se utilizará en este estudio para describir los remolinos de mesoscala en la DJF será obtenida a través de las salidas del modelo oceánico “Regional Ocean Modeling System” (ROMS; Shchepetkin y McWilliams, 2005). ROMS es un modelo oceánico regional que resuelve ecuaciones primitivas hidrostáticas usando una superficie libre que usa coordenadas verticales que siguen la topografía y coordenadas ortogonales curvilíneas en la horizontal. La versión AGRIF (Adaptive Grid Refinement in Fortran; Debreu et al., 2008) de ROMS fue seleccionada para el procedimiento de anidamiento de 2 vías (Debreu et al., 2011) en el que un modelo “hijo” de alta resolución está inserto en un modelo “padre” de resolución más gruesa. La grilla padre se extiende hacia el norte desde 42.8°S a 26.5°S de latitud y hacia el oeste desde la costa a 85.8°W de longitud con una resolución espacial de 1/24° ( $\sim 3,87$  km en la altitud de Valparaíso) y consta de 40 niveles verticales con resolución incrementada en la superficie. La grilla hijo abarca la DJF y se extiende desde 82.1°W a 75.4°W de longitud y desde 35.9°S a 32°S de latitud (Figura 3.2). La grilla hijo tiene una resolución espacial de 1/72° ( $\sim 1,28$  km) y 40 niveles verticales. La batimetría de fondo fue derivada

de ETOPO1 (1' de resolución, Amante y Eakins, 2009). La región fue modelada para un período que abarca los años desde 2000 a 2008, siendo el año 2000 el año de estabilización del modelo. Los detalles del modelo externo, el cual provee las condiciones iniciales del modelo usado en este estudio, son descritos en Combes et al., (2015). La información entregada por el modelo está basada en salidas promediadas cada 5 días.

En la superficie, el modelo fue forzado con datos del reanálisis global ERA-Interim, desarrollado por el Centro Europeo para la Predicción del Clima a Mediano Plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF) con una resolución espacial de 0.75° (Dee et al., 2011) y datos QuickSCAT de resolución espacial 0.25°. La formulación de Fairall et al., (1996) deriva el estrés del viento superficial, los flujos de calor y de agua dulce a partir de promedios diarios de temperatura del aire a 2 metros, humedad relativa, precipitación, radiación de onda corta y larga de los datos ERA-Interim y a partir de promedios diarios del viento a 10 m de QuikSCAT.

La información entregada por las salidas de ROMS será utilizada para dos fines: (1) la identificación de los remolinos de mesoscala superficiales y subsuperficiales que interactúan con la DJF y (2) para implementar un IBM que permita estudiar la distribución y el crecimiento de organismos con estrategias de migración vertical contrastantes y la interacción de éstas con los remolinos de mesoscala. El IBM fue desarrollado en el marco de esta tesis.

## **3.2. Detección Automatizada de Remolinos Superficiales**

### **Algoritmo de identificación de remolinos**

Los remolinos de mesoscala pueden ser identificados y observados desde altimetría satelital o datos in situ. Sin embargo, para un período prolongado se requieren algoritmos competitivos de identificación automatizada (Chaigneau et al., 2008). Son diversas las técnicas propuestas para la identificación automatizada de remolinos, pero se pueden

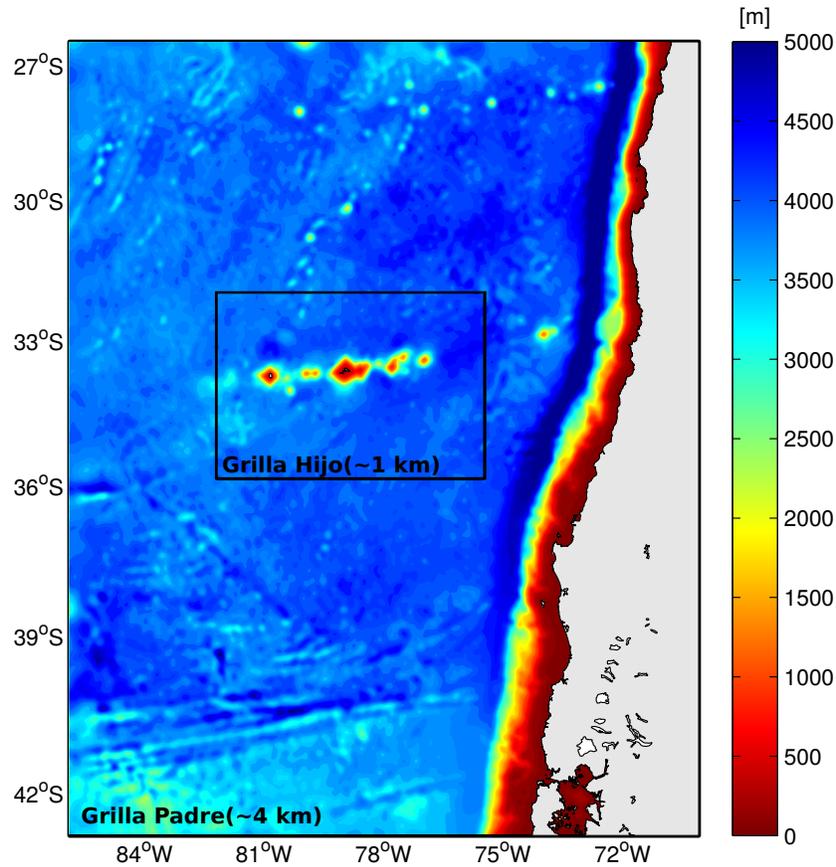


Figura 3.2: Batimetría del modelo ROMS. Dominio del modelo padre ( $\sim 4$  km) que contempla parte de la costa chilena y dominio del modelo hijo ( $\sim 1$  km) que abarca la dorsal de Juan Fernández.

englobar en tres grandes métodos: físico, geométrico y la mezcla entre ellos. El método físico 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). En este método destaca la utilización del parámetro de Okubo-Weiss (OW), el cual es una medida que relaciona la deformación y rotación del fluido (Chelton et al., 2007) y se define con la ecuación:

$$W = S_n^2 + S_s^2 - \xi^2 \quad (3.1)$$

donde  $S_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$  es la componente normal de la deformación,  $S_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$  es la componente del cizalle de la deformación y  $\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  es la vorticidad relativa del fluido (Weiss, 1991), donde  $u$  y  $v$  son las componentes de la velocidad en las direcciones

$x$  e  $y$  respectivamente.

Usando OW, se considera que un vórtice o remolino existe cuando la rotación del fluido domina por encima de su deformación, es decir, cuando el parámetro OW es negativo, entonces para poder identificar remolinos se establece un umbral negativo y sólo se seleccionan las regiones donde el parámetro de Okubo-Weiss está por debajo de ese umbral negativo (Chelton et al., 2007), dicho de otra manera, las regiones en donde el fluido es dominado por la vorticidad. Sin embargo, los umbrales establecidos pueden ser modificados arbitrariamente, haciendo que la identificación de remolinos sea un proceso subjetivo (Chaigneau et al., 2008). Así, el método físico a menudo falla al identificar remolinos y tiende a ser inexacto (Basdevant y Philipovitch, 1994).

El segundo método para la identificación de remolinos está basado en la geometría del fluido. Los vórtices consisten en patrones del flujo quasi-circular, este criterio usa la forma de las líneas de corriente instantánea o los contornos cerrados de la altura superficial del mar (ASM). 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. El método geométrico tiende a ser menos problemático y parece producir mejores resultados comparado con métodos físicos como el parámetro de Okubo-Weiss (Chaigneau et al., 2008; Chelton et al., 2011; Souza et al., 2011).

Finalmente, existe un tercer método que es la unión o mezcla de los métodos mencionados anteriormente (método físico y método geométrico), al cual llamaremos método híbrido. En este estudio, la detección de remolinos se hizo mediante un algoritmo híbrido de identificación que fue desarrollado por Halo et al., (2014). En base a este método de detección, un remolino geostrófico está definido como la región contenida en un contorno cerrado de ASM y además que está dominado por la vorticidad, es decir, que el parámetro de OW sea negativo. Primero, utilizando el método físico, el parámetro de OW es calculado desde las velocidades geostróficas para detectar los remolinos. En este estudio se utilizó un umbral de OW de  $-2 \times 10^{-12} s^{-2}$  (Chelton et al., 2007).

Además, este algoritmo híbrido emplea la detección mediante el método geométrico, seleccionando las regiones con contornos cerrados de ASM. Para prevenir la selección de giros oceánicos como contornos cerrados, se utilizó un radio máximo de 300 km. Así, al combinar las regiones con OW negativo y las regiones con contornos cerrados de ASM, se obtiene un patrón más consistente donde se excluyen las características detectadas fallidamente por OW. Finalmente, el algoritmo selecciona los remolinos que coinciden, tanto con el método físico como con el método geométrico, y mediante el cálculo de la vorticidad relativa identifica su polaridad, es decir, si es anticiclón o ciclón (Figura 3.3).

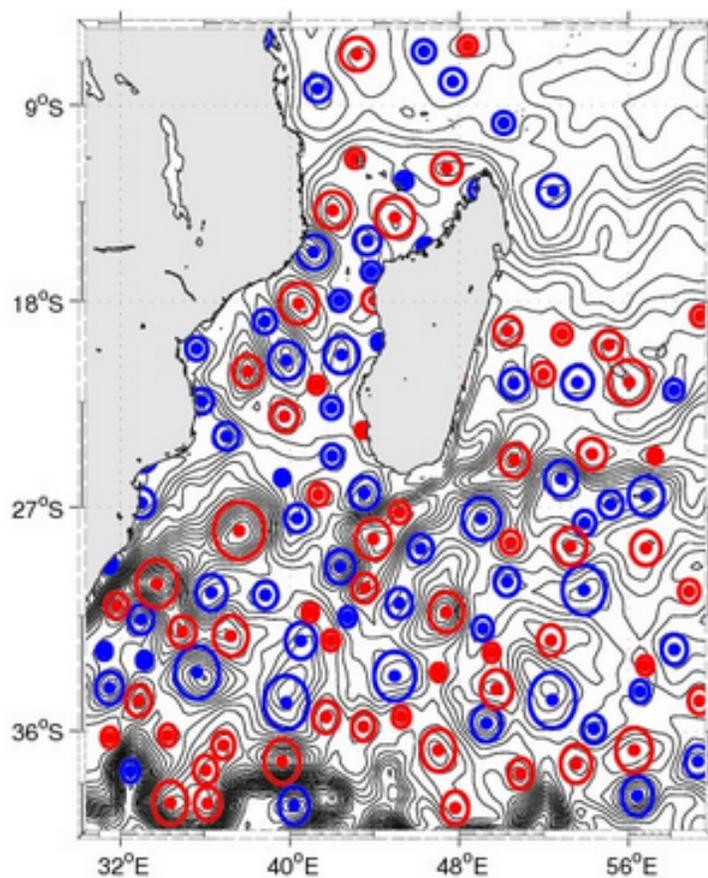


Figura 3.3: Resultado final de identificación y selección del algoritmo de detección automatizado de remolinos desarrollado por Halo et al., (2014) utilizado en el Canal de Mozambique. Colores rojos corresponden a anticiclones y los colores azules a ciclones. Figura extraída de Halo et al., (2014).

### Algoritmo de seguimiento de remolinos

El algoritmo de seguimiento de remolinos en el tiempo, usado en este estudio, está basado en el método propuesto por Penven et al., (2005), en donde un remolino detectado en un paso de tiempo es el mismo remolino en el siguiente paso de tiempo. Esto se reconoce si la distancia  $D$  entre remolinos detectados en dos pasos de tiempo consecutivos es mínima, esta distancia generalizada se define en la ecuación 3.2:

$$D_{e_1, e_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \xi}{\xi_0}\right)^2} \quad (3.2)$$

Donde  $\Delta D$  es la distancia espacial entre los remolinos  $e_1$  y  $e_2$ ,  $\Delta R$  y  $\Delta \xi$  corresponden a la variación del radio y vorticidad relativa, respectivamente entre  $e_1$  y  $e_2$ .  $D_0$ ,  $R_0$  y  $\xi_0$  son los valores característicos de separación (25 km), radio (50 km) y vorticidad relativa ( $10^{-6} s^{-1}$ ) respectivamente. El algoritmo de seguimiento identifica el par de remolinos ( $e_1, e_2$ ) que minimiza esta distancia. Mientras menores son los valores de  $D$ , existen mayores similitudes entre dos remolinos detectados en pasos de tiempo consecutivos. Además, el algoritmo considera que ambos remolinos tengan la misma vorticidad y que la velocidad de propagación entre ellos no exceda un umbral. Para este estudio se estableció un umbral de  $\sim 2$  km por día (Hormazábal et al., 2004). Finalmente, si se cumplen estas tres condiciones entre dos remolinos consecutivos (mínima  $D$ , misma vorticidad y velocidad bajo el umbral), se considera que el remolino  $e_1$  en el  $t_1$  y el remolino  $e_2$  en el  $t_2$  son el mismo.

El algoritmo de identificación y el algoritmo de seguimiento de remolinos son programas desarrollados en Matlab y de acceso libre en la página web:

<http://www.simocean.org.za/tooleddy.php>.

Con la información obtenida de la detección automatizada se analizó la estadística de los remolinos de mesoscala como el número de remolinos (espacial y temporalmente), la polaridad y el radio. La polaridad (P) representa la probabilidad de un punto, dentro

de un remolino, de ser un ciclón, es decir, polaridad  $< 0$  o anticiclón, es decir, polaridad  $> 0$  (Chaigneau et al., 2009) y se calcula como:

$$P = \frac{F_a - F_c}{F_a + F_c} \quad (3.3)$$

Donde  $F_a$  y  $F_c$  corresponde a la frecuencia de remolinos anticiclónicos y ciclónicos respectivamente.

Para calcular el radio de un remolino, este algoritmo detecta los extremos (mínimos y máximos) locales de la superficie libre del mar (zeta) en cada paso de tiempo, estos extremos corresponden a los centros de los vórtices. Luego para cada uno de estos extremos, busca la mínima distancia entre el extremo local y donde el parámetro de OW cambia de signo (Penven et al., 2005).

En este estudio se consideran todos los remolinos superficiales detectados con un radio  $> 25$  km y con un tiempo de vida mayor a un mes.

### 3.3. Detección Remolinos Subsuperficiales

En presencia de un remolino subsuperficial anticiclónico las isothermas se deforman en una especie de lente (Figura 3.4), así para identificar un remolino subsuperficial anticiclónico se pueden usar las deflexiones de las isothermas. Andrade et al., (2014) expone que las isothermas que sufren mayor deformación en las proximidades del AJF son la isoterma de  $11^\circ\text{C}$  en el límite superior del remolino y la isoterma de  $8^\circ\text{C}$  en el límite inferior del remolino. Aunque a simple vista, las salidas del modelo ROMS, muestran que la isoterma de  $12^\circ\text{C}$  tiene una mayor deflexión que la isoterma de  $11^\circ\text{C}$  (Figura 3.4), en este estudio se trabajó con la profundidad de la isoterma de  $11^\circ\text{C}$  pues ya está documentado en la literatura. De acuerdo al estudio de Andrade et al., (2014), la reconstrucción espacial de las profundidades de las isothermas de  $8^\circ\text{C}$  y  $11^\circ\text{C}$  indicó una clara propagación hacia el noroeste, coincidiendo con la propagación de remolinos anticiclónicos, asociándolas a la variabilidad de mesoscala. Así, en base a esta información encontrada en la literatura, para la detección de remolinos subsuperficiales

se identificaron las profundidades más cercanas a las isoterms de 8°C y 11°C en cada paso de tiempo de las salidas del modelo ROMS, obteniendo series de tiempo de datos mensuales de la profundidad de la isoterma de 11°C ( $P_{11}$ ), de la profundidad de la isoterma de 8°C ( $P_8$ ) y de la diferencia entre las profundidades de ambas isoterms ( $\Delta P_t$ ). Para evaluar si  $\Delta P_t$  tiene la misma variabilidad que  $P_8$  y  $P_{11}$  se identificaron los ciclos más importantes de estas 3 variables mediante el Método MultiTaper Method-Singular Value Descomposition (MTM-SVD). El MTM-SVD identifica las frecuencias que son estadísticamente significativas entre un gran número de series normalizadas, es decir, aquellas que contribuyen con una fracción significativa de la varianza total de los datos, transformando la serie de datos del dominio temporal al dominio espectral, mediante un análisis espectral multitaper (Correa-Ramirez y Hormazábal, 2012).

Además, se utilizaron campos mensuales de salinidad y vorticidad relativa promediadas entre los 150 m y 400 m para verificar si los patrones espaciales entregados por  $\Delta P_t$  correspondían a remolinos anticiclónicos subsuperficiales.

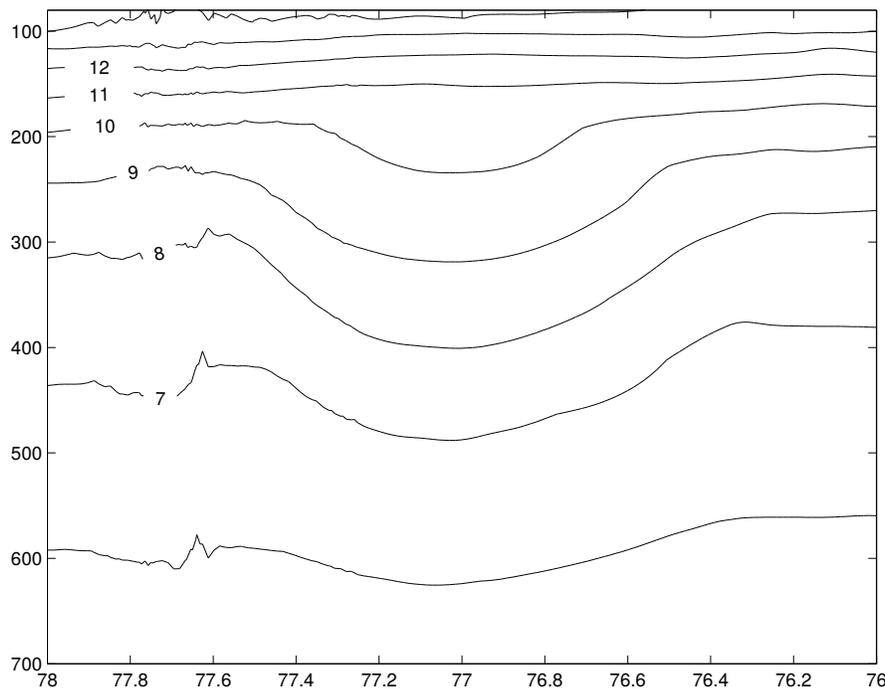


Figura 3.4: Ejemplo de la deformación de las isoterms en presencia de un remolino subsuperficial anticiclónico en las proximidades de la DJF el 6 de noviembre del 2004, información obtenida del modelo hijo de ROMS. Las isoterms adoptan una forma de lente, deformándose en forma convexa las isoterms superiores como muestra la isoterma de 12°C y en forma cóncava las isoterms inferiores como muestra la isoterma de 8°C.

### Casos de estudio

Con la información entregada por los campos espaciales de  $\Delta P_t$ , salinidad y vorticidad relativa se seleccionaron 2 casos de estudio en donde la presencia de remolinos de mesoscala ciclónicos y anticiclónicos en la DJF podrían jugar un papel importante en la distribución de especies pelágicas. Las fechas de los casos fueron octubre del 2002 y enero del 2005, estas fechas se escogieron en base a la presencia de remolinos de gran tamaño, ciclónicos y anticiclónicos, y de remolinos deformados por la DJF. Así, se puede evaluar el contraste entre los diferentes tipos de remolinos y entre remolinos que están siendo deformados y los que no. El detalle de los remolinos presentes en cada caso se encuentra en la Sección 4.2. Para evaluar el rol de los remolinos en cada caso y poder entender las relaciones entre las componentes físicas y biológicas se implementó un IBM para las fechas mencionadas.

### 3.4. Modelo Basado en Individuos (IBM)

En este estudio se utilizó el modelo biofísico Ichthyop para evaluar la distribución y el crecimiento de especies tipo de la DJF en sus primeros estadios larvales y para entender cómo interactúan las estrategias de migración vertical con los procesos físicos de mesoscala como los remolinos. Ichthyop es un modelo desarrollado para el estudio de los factores biológicos y físicos que influyen en la dinámica de huevos y larvas. Esta herramienta es de acceso libre y la versión original puede ser descargada desde la página web <http://www.ichthyop.org/downloads>. Los detalles de este modelo biofísico y de su configuración se pueden encontrar en Lett et al., (2008). Para este estudio se modificó la versión original de Ichthyop mediante los submodelos biológicos y fue acoplado con el modelo hidrodinámico ROMS, cuya resolución espacial permite representar la información dinámica de estructuras de mesoscala como remolinos.

Se desarrollaron 3 submodelos biológicos para caracterizar estrategias de vida contrastantes en el plancton en función de la sincronización de las larvas, su distribución

espacial y la migración vertical. A continuación se detallan los 3 submodelos biológicos:

**1. Sincronización larval.** Se seleccionaron 2 períodos de liberación larval en función de los casos de estudio. En cada caso de estudio, las partículas fueron lanzadas simultáneamente el primer día de simulación. Las fechas de liberación corresponden al 6 de octubre del 2002 y al 1 de enero del 2005.

**2. Distribución larval en el plancton.** La selección de las áreas de liberación se realizó en función de las características topográficas y ecológicas en la DJF. La grilla hijo se dividió en 221 áreas, de las cuales 29 fueron escogidas como áreas de lanzamientos, conformando 4 subsistemas que se muestran en la Figura 3.5. Las zonas escogidas fueron zonas alrededor de las islas RC y AS y zonas en donde existen montes submarinos pertenecientes a la DJF. El primer subsistema corresponde a los alrededores de Alejandro Selkirk (Subsistema S1), definido por las áreas 117, 118, 119, 142, 143, 144, 166, 167 y 168. El segundo subsistema está dado por las áreas 126, 127, 128, 151, 152, 153, 175, 176 y 177 correspondiente a los alrededores de Robinson Crusoe (Subsistema S2). El subsistema compuesto por las áreas 96, 120, 146, 147, 148 y 149 que corresponde a la parte oeste de la DJF (Subsistema S3) en donde se ubican los montes submarinos JF10, JF11, JF12, JF13, JF14 y JF15, mientras que el subsistema compuesto por las áreas 154, 159, 182, 185 y 207 que corresponde a la parte este de la DJF (Subsistema S4) en donde se localizan los montes JF2, JF3, JF4, JF5 y JF6.

29000 partículas virtuales, que representan larvas pelágicas de especies tipo de la DJF, fueron lanzadas aleatoriamente entre los 50 primeros metros de profundidad en las 29 áreas escogidas.

**3. Comportamiento vertical.** Se definieron tres experimentos de comportamiento vertical:

(1) Migración diurna nictimeral profunda (MNP): Se caracteriza por un patrón de migración limitado verticalmente entre 10 y 200 metros de profundidad. Los individuos ascienden durante las horas de noche y descienden en las horas de día.

(2) Migración diurna nictimeral superficial (MNS): Se caracteriza por un patrón de mi-

gración limitado verticalmente entre 0 y 50 metros de profundidad. Se define la posición de las partículas durante el día con un rango de aleatoriedad en donde los individuos ascienden durante las horas de noche y descienden en la horas del día.

(3) Comportamiento pasivo (CP): Son partículas pasivas, sin migración vertical, que se transportan sólo siguiendo el campo de corrientes.

Las larvas simuladas que tienen MNP coinciden con especies tipo de la DJF como el Lenguado de Juan Fernández (*Paralichthys fernandezianus*) y el Pampanito (*Scorpiis chilensis*). Esta especie tipo desova a no más de 50 m de profundidad y las larvas tienen un tiempo de vida en el plancton de  $\sim 2$  meses (Base de datos FISHBASE). Las larvas CP corresponden a un experimento control.

Para estudiar la dispersión horizontal, se evaluaron los patrones de distribución horizontal de las partículas lanzadas transcurridos 20, 30 y 40 días de simulación, comparando los experimentos con MNP, con MNS y CP.

Para evaluar el efecto en el crecimiento, para cada caso de estudio, se evaluó un índice isotermal representativo del crecimiento. Los grados por día (GD) es un método para describir la oportunidad termal para el crecimiento y desarrollo. Los GD para un organismo en un día son calculados como:

$$GD = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_0 \quad (3.4)$$

donde  $T_{max}$  y  $T_{min}$  son las temperaturas ambientales a las que está expuesta la partícula y  $T_0$  es una temperatura base o umbral por debajo de la cual el crecimiento es bajo o cero.

Hay muchos métodos para estimar  $T_0$  y una diversidad de valores para cada especie. En este estudio, dado que existe escasa información de las especies y/o grupos funcionales de la DJF, se utilizó el criterio de calcular la temperatura media del ambiente del mes climatológico en evaluación y al que se le asignó el valor de  $T_0$ . Así se realizó un

estudio de sensibilidad dado un rango de variación de la temperatura para  $T_0$ . Esto, para evaluar el impacto en el crecimiento de los individuos modelados a través del GD. Las pruebas de sensibilidad se realizaron con un rango de temperatura de  $T_0$  correspondiente a 14°C, 16°C, 15°C y 13°C como  $T_0$ . Los dos primeros valores corresponden a la temperatura media, de los primeros 200 m de la columna de agua de la DJF, del ambiente del mes climatológico de enero y de octubre, el tercer valor corresponde a un valor medio entre estos meses y el último corresponde al mes climatológico más frío del año, julio. Cada GD fue evaluado durante 28 días en los individuos que están localizados dentro de los remolinos de mesoscala de los casos de estudio, y también se evaluó en las zonas con mayor agregación de partículas.

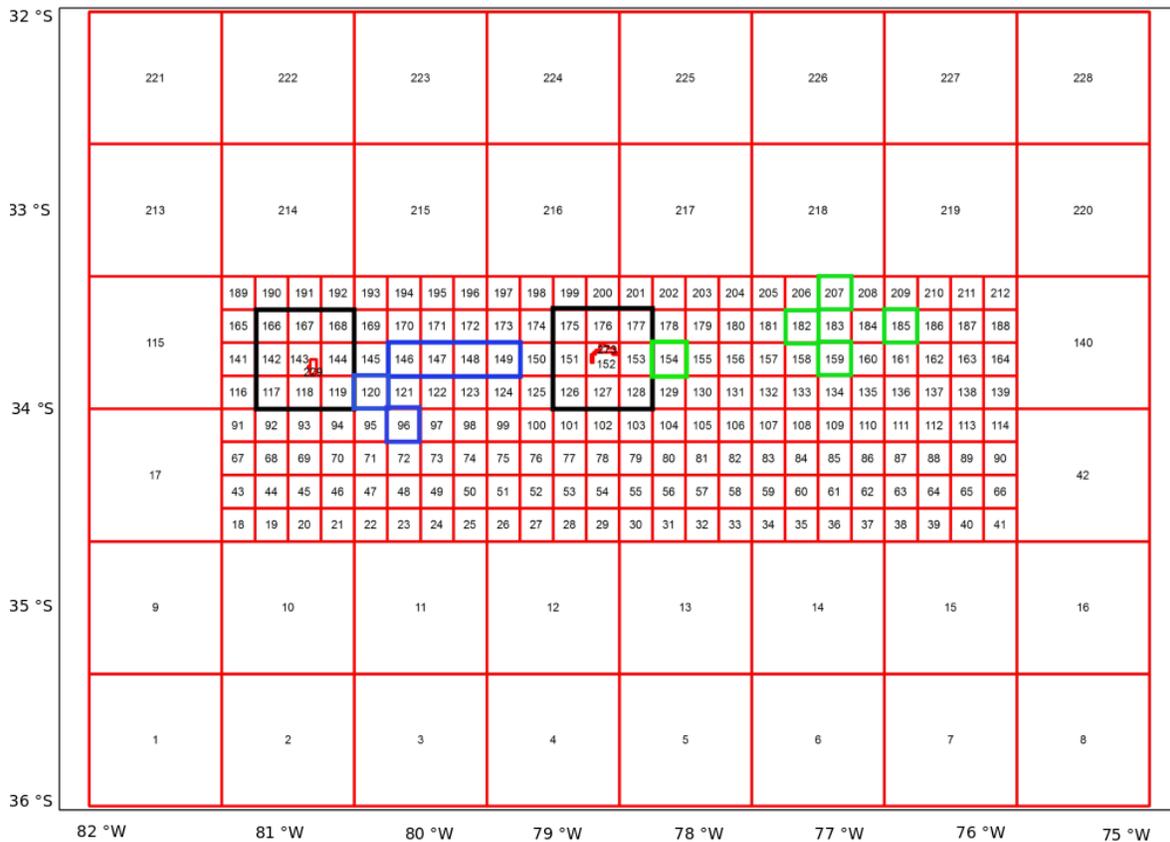


Figura 3.5: Grilla hijo dividida en 221 áreas, las áreas color negra corresponden al subsistema S1 y S2, las áreas color azul y verde corresponden al subsistema S3 y S4 respectivamente.

---

## 4. Resultados y Discusión

A continuación se presentan los principales resultados de este estudio: (4.1) Detección Automatizada, (4.2) Remolinos Subsuperficiales y (4.3) Modelo Basado en Individuo.

### 4.1. Remolinos superficiales de mesoscala

Para analizar los resultados de la detección de remolinos superficiales que interactúan con la DJF se definió un polígono que incluye los montes e islas de la dorsal (cuadro negro en las figuras), a partir de ahora identificado como DJF. La parte oriental de la DJF corresponde al área entre las longitudes  $76^{\circ}\text{W}$  y  $79^{\circ}\text{W}$  del cuadro negro, mientras que la parte occidental corresponde al área entre las longitudes  $79^{\circ}\text{W}$  y  $82.5^{\circ}\text{W}$ .

#### Número y Polaridad de los remolinos

El número total de remolinos detectados (Tabla 4.2) corresponde a la sumatoria de los remolinos detectados en cada paso de tiempo, es decir, un mismo remolino es contado todas las veces en la que sea detectado. El número de remolinos detectados en la grilla padre, durante los 8 años de simulación numérica corresponde a 26762, de los cuales 12409 (46.4%) correspondieron a remolinos anticiclónicos (Ra) y 14353 (53.6%) correspondieron a remolinos ciclónicos (Rc). Dentro del polígono definido como la DJF se detectaron 1498 remolinos superficiales, siendo de 715 (47.7%) del tipo Ra y 783 (52.3%) del tipo Rc. Cabe mencionar que en los algoritmos automatizados de detección de remolinos existe un grado de error. Según el autor del algoritmo, para estimar el error se deben ajustar algunos parámetros de entrada (e.g el parámetro de

OW, el intervalo entre los contornos de altura superficial del mar) y hacer pruebas de sensibilidad. Una metodología a seguir es la propuesta por Chaigneau et al., (2008), por restricciones de tiempo esto no se pudo desarrollar, por lo que el error de detección no fue considerado en este estudio.

La representación espacial de la cantidad de remolinos por punto de grilla (dada por la resolución del modelo padre) para los 8 años de simulación se muestra en la Figura 4.6. Se aprecian altas concentraciones de remolinos (colores más rojos) cerca de la costa, alcanzando valores de hasta 150 remolinos por punto de grilla. Este patrón espacial coincide, cualitativamente, con estudios basados en altimetría satelital (Chaigneau et al., 2009). La zona con mayor número de remolinos corresponde a parte de la ZTC, región que se extiende desde la costa hasta  $\sim 600 - 800$  km mar adentro entre las latitudes  $\sim 30^\circ - 38^\circ\text{S}$  (Hormazábal et al., 2004), caracterizada justamente por una alta cantidad de remolinos. Por otro lado, la región oceánica presenta menos remolinos, especialmente la zona sur del dominio padre (sobre los  $32^\circ\text{S}$ ).

Tabla 4.1: Número de remolinos detectados con algoritmo de Halo et al., (2014).

	<b>Grilla Padre</b>	<b>DJF</b>
TOTAL	26762	1498
Ra	12409 (46.4 %)	715 (47.7 %)
Rc	14353 (53.6 %)	783 (52.3 %)

Se observa que la parte oriental de la DJF, parte de la ZTC, presenta interacción con una mayor cantidad de remolinos en comparación con el lado occidental de la DJF. Existe una variabilidad interanual en el número de remolinos detectados. El año con menor cantidad de remolinos detectados en la grilla padre fue el 2003 con 3064 y el año con mayor cantidad de remolinos corresponde al 2007 con 3722 (Figura 4.7.a). La variabilidad interanual de la polaridad de los remolinos, tanto de los Rc y como de los Ra sigue el mismo patrón, aunque los Rc presentan mayor frecuencia que los Ra. Esto es consistente pues se ha documentado que la superficie es dominada por los Rc (Combes et al., 2015). En la DJF, el año con menor cantidad de remolinos fue el año

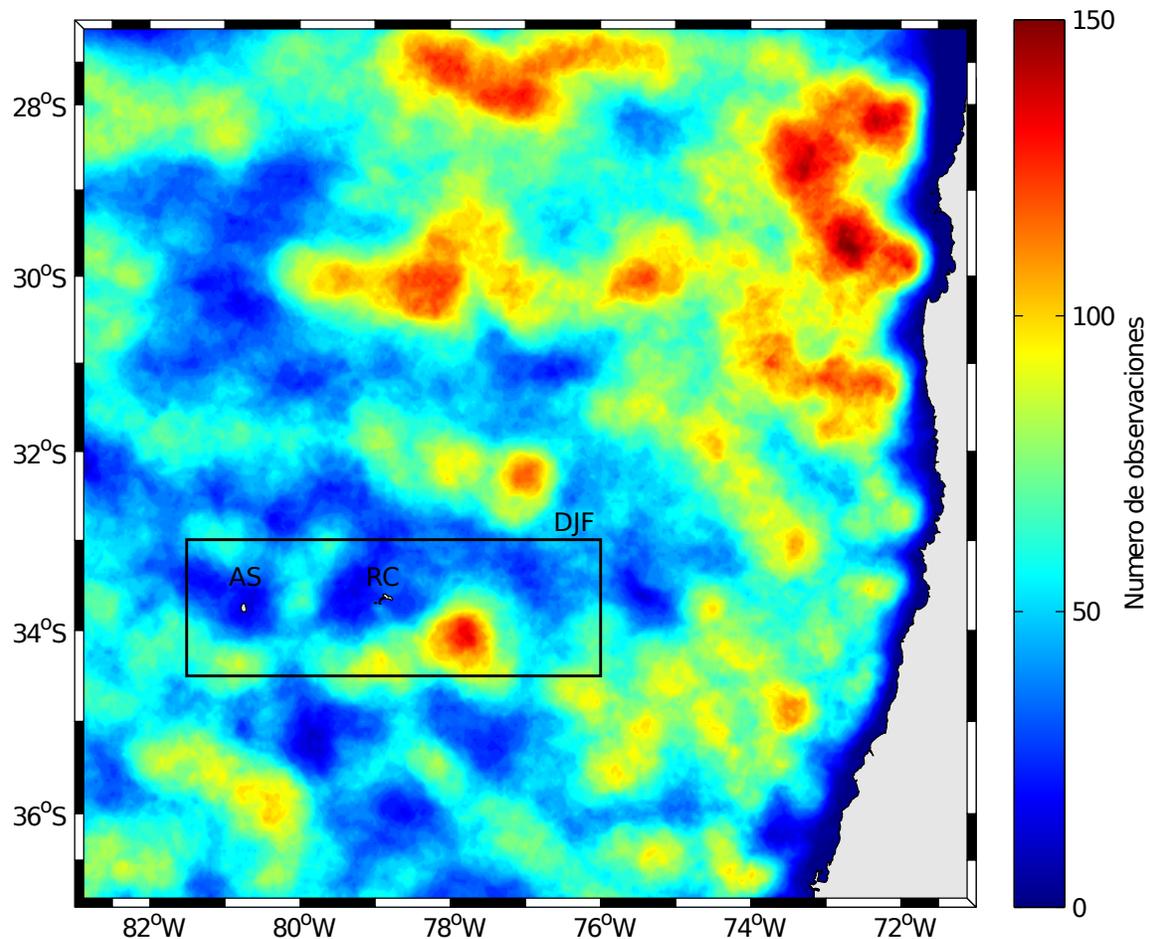


Figura 4.6: Distribución espacial de los remolinos de mesoscala entre las latitudes 27°S y 37°S, desde la costa hasta los 83°W. Los colores representan la cantidad de remolinos detectados por punto de grilla durante el período 2001-2008.

2006 mientras que el año 2001 presentó la mayor cantidad (Figura 4.7.b). En algunos años (año 2003, 2005, 2006 y 2008) los Ra muestran mayor frecuencia que los Rc, y en los otros años es menor que los Rc, con un patrón no muy claro. La variabilidad interanual espacial del número de remolinos se muestra en la Figura 4.8. Durante los años 2002-2003 en la zona de transición costera (ZTC) se reduce notablemente el número de remolinos. Estos años corresponden a un evento de El Niño (ENFEN, 2003). Por otro lado, los años 2007-2008 presentan mayor número de remolinos en la ZTC (especialmente el año 2008), precisamente en estos años se desarrolló un evento La Niña. Aunque se ha observado que frente a las costas de Perú, el número de remolinos son más bajos en algunos años Niño (Chaigneau et al., 2008), no hay claridad sobre el impacto de los años Niño/Niña sobre la variabilidad de los remolinos frente a las costas de Chile, ni de los

mecanismos físicos responsables de las variaciones interanuales de la actividad de éstos. Aunque, recientemente se ha documentado que el número de remolinos subsuperficiales anticiclónicos y el volumen de éstos muestran una correlación significativa con la variabilidad ecuatorial, mientras el transporte de la Corriente subsuperficial de Perú-Chile es más fuerte en los años Niño, el número de remolinos subsuperficiales disminuye (Combes et al., 2015). Otro punto a destacar es la posición de las zonas con mayor número de remolinos, en algunos años se concentran cerca de la costa (2005 y 2006) y en otros años hay un desplazamiento hacia el noroeste de las mayores concentraciones (2004 y 2008). Esta variabilidad interanual afecta espacialmente la distribución de remolinos que interactúan con la DJF. Así, cada año la contribución de los remolinos al impacto en la distribución de especies pelágicas en la DJF podría presentar una variabilidad.

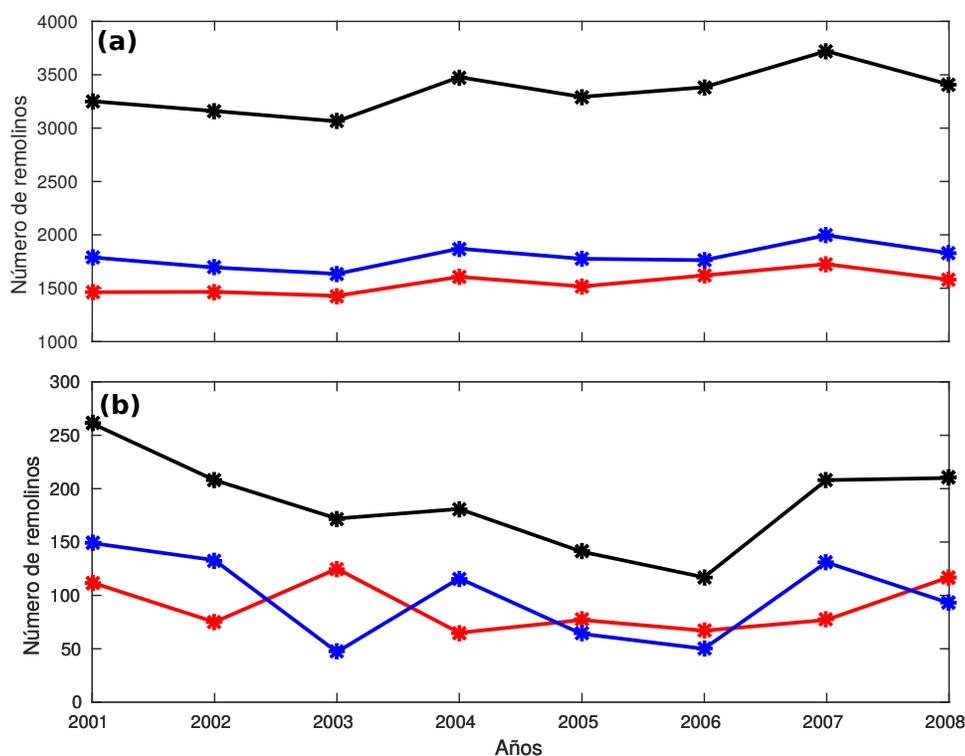


Figura 4.7: Variabilidad temporal de la cantidad de remolinos detectados por año en (a) la grilla padre y en (b) la DJF. La línea negra corresponde a la cantidad total de remolinos, la línea roja corresponde a la cantidad de Ra y la línea azul a la cantidad de Rc.

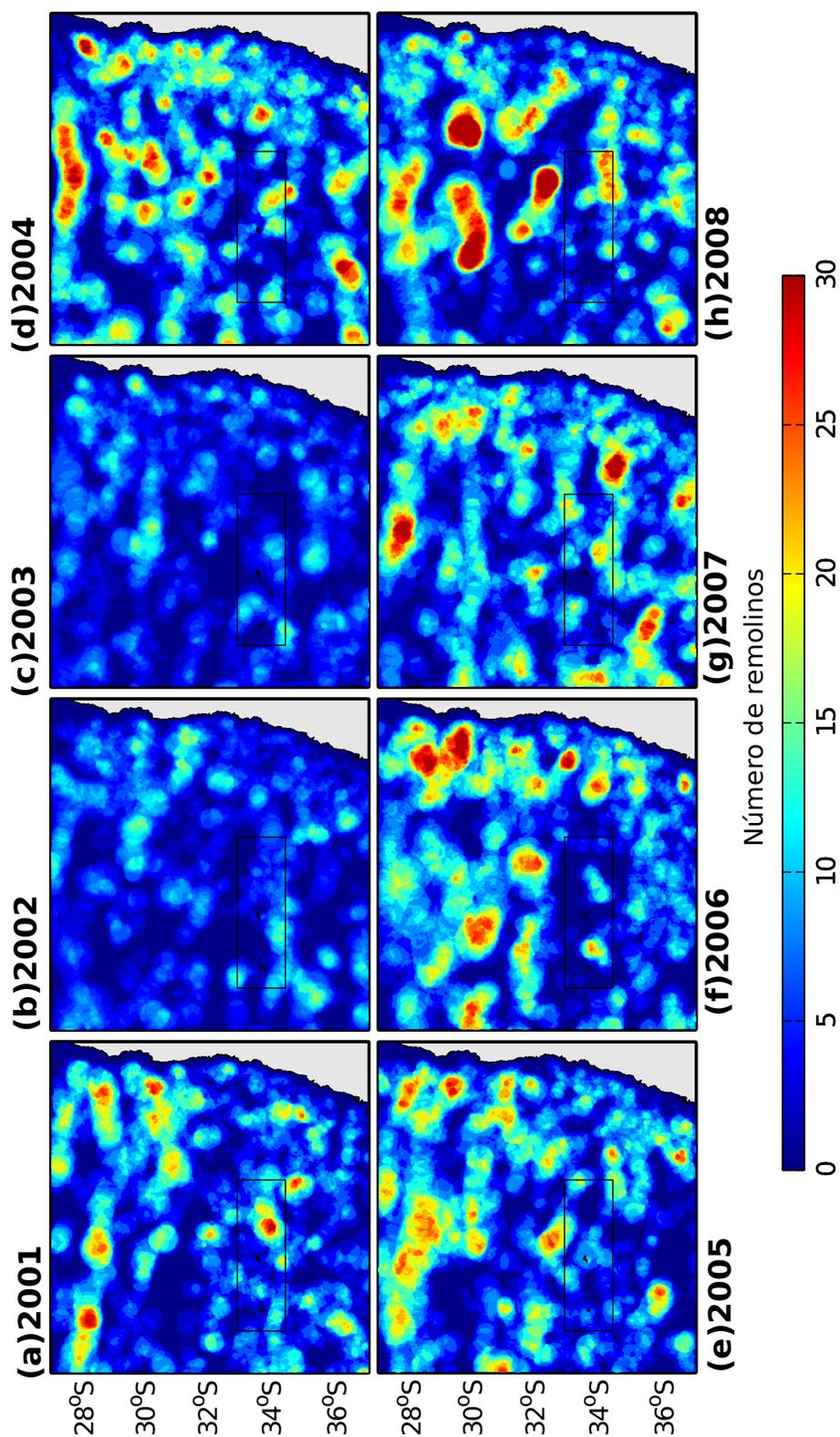


Figura 4.8: Variabilidad espacial de la cantidad de remolinos detectados por año para el período 2001-2008. Los recuadros negros definen la DJF.

Los colores en la Figura 4.9 representan la polaridad media por punto de grilla, para los 8 años de simulación, siendo los valores positivos predominancia de anticiclones, con un valor máximo de 1, mientras los valores negativos representan la predominancia de remolinos ciclónicos, siendo su valor máximo -1. La figura muestra marcadas zonas de polaridad. Sin embargo, no se logra apreciar si una polaridad domina sobre la otra en todo el dominio. A lo largo de la costa se observa una marcada banda anticiclónica, la que ha sido registrada en otros estudios (Chaigneau et al., 2009). Para la zona de la DJF se aprecia que el lado oriental tiene mayor interacción con Ra, mientras en el lado occidental muestra una distribución más equitativa. El lado este de la isla AS tiene más interacción con Ra, mientras que el lado oeste con Rc, configurando una especie de dipolo.

## Radio

El radio de los remolinos detectados en la grilla padre, tanto anticiclones como ciclones, se distribuyen entre 30 a 110 km, presentando una mayor frecuencia en los  $\sim 50$  km (Figura 4.10). La distribución de los remolinos que interactúan con la DJF (Figura 4.11) también concentra la mayoría de los remolinos en un radio de  $\sim 50$  km, mientras que no se observan remolinos con un radio mayor a 90 km en esta subregión. Los resultados de la distribución espacial del radio promedio (anticiclones y ciclones) se muestra en la Figura 4.12. El tamaño de los remolinos es función de la latitud y tiende a aumentar su tamaño en dirección noroeste, alcanzando valores de  $\sim 100$  km. La distribución del radio total promedio es acorde con la teoría quasi-geostrófica, la que establece que el tamaño de los remolinos decrece hacia los bordes este y hacia los polos relacionado con el cambio en el radio de deformación de Rossby que depende, a su vez de la estratificación y la fuerza de Coriolis (Cushman-Roisin, 1994).

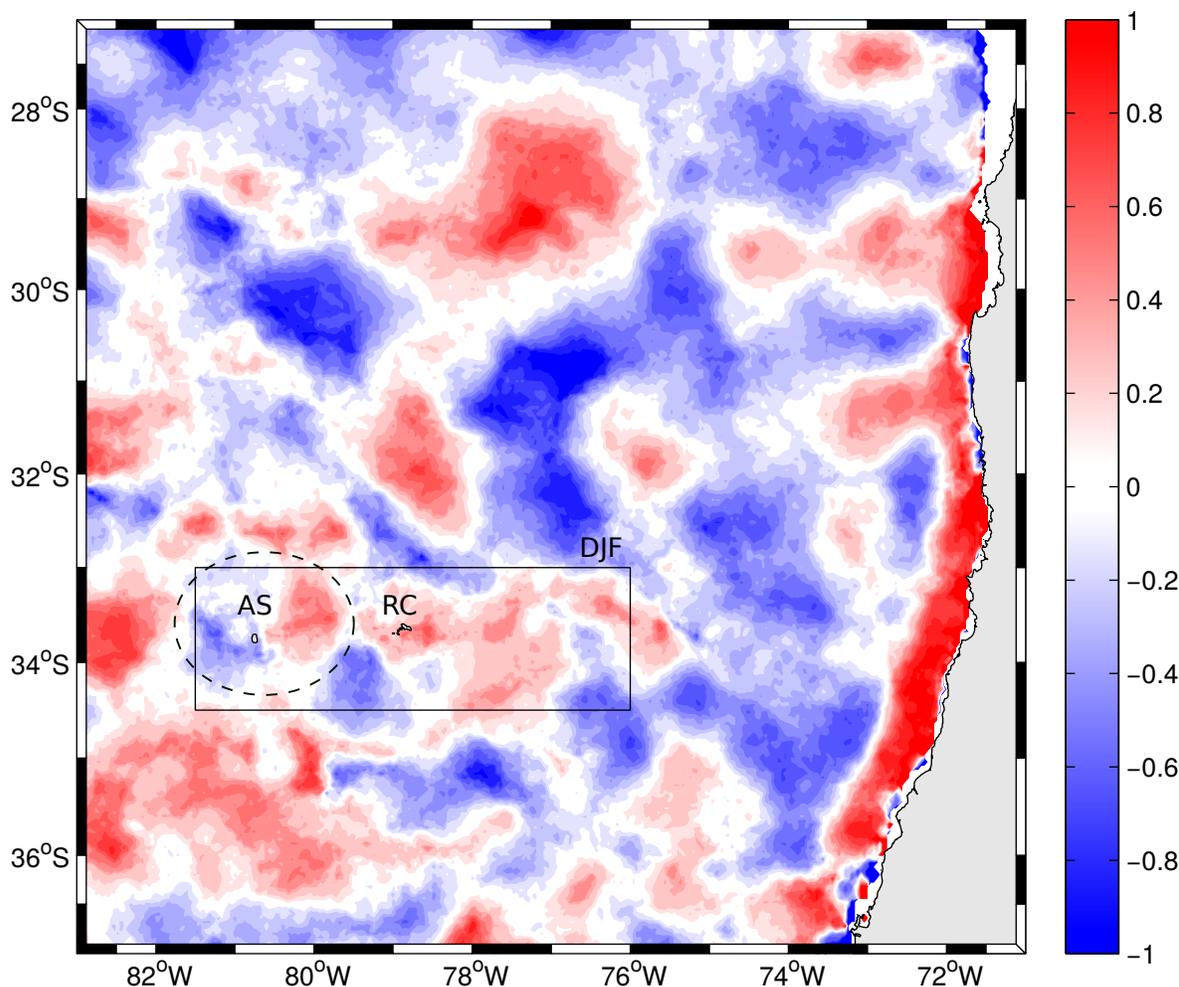


Figura 4.9: Distribución espacial de la polaridad media de los remolinos por punto de grilla para los 8 años de simulación (2001-2008). Los valores negativos corresponden a una predominancia ciclónica, mientras que los valores positivos a anticiclónica.

## Trayectorias

Las trayectorias de los remolinos ciclónicos tienden a tener una dirección hacia el oeste/suroeste, observándose una mayor densidad de trayectorias en el norte (Figura 4.13, izquierda). Los remolinos anticiclónicos presentan trayectorias hacia el noroeste y una mayor distribución de trayectorias hacia el sur del dominio (Figura 4.13, derecha) a diferencia de los remolinos ciclónicos. Esta diferencia entre las trayectorias de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos está vinculado al efecto beta: debido a la rotación de los remolinos, el agua circundante es adveccionada a diferentes latitudes, por lo tanto cambia su vorticidad planetaria (Cushman- Roisin, 1994). Por conservación de vorticidad po-

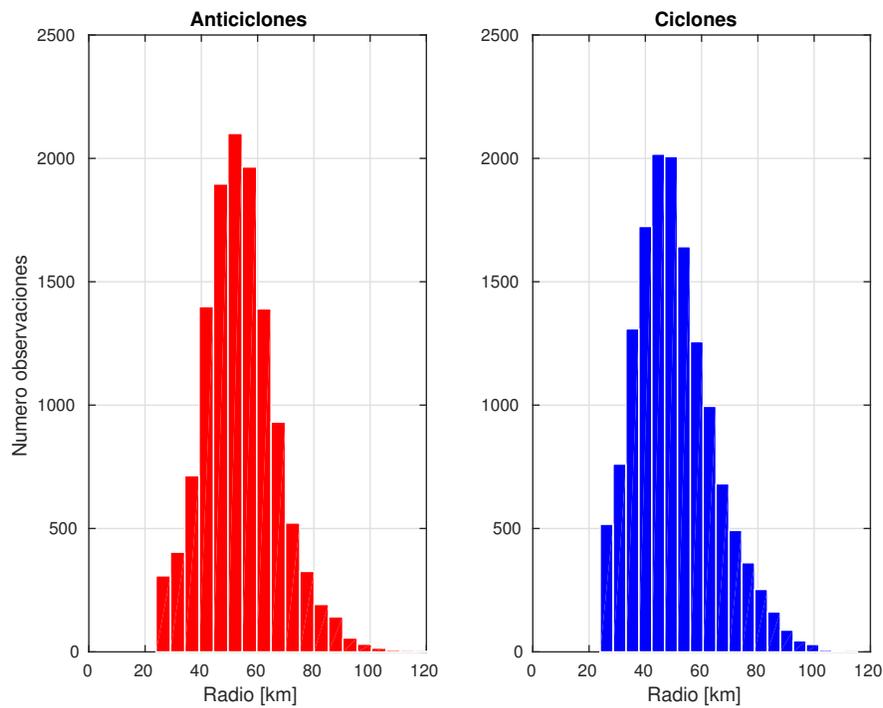


Figura 4.10: Distribución del número de remolinos detectados en la grilla padre en función del radio de los remolinos (a) anticiclónicos y (b) ciclónicos.

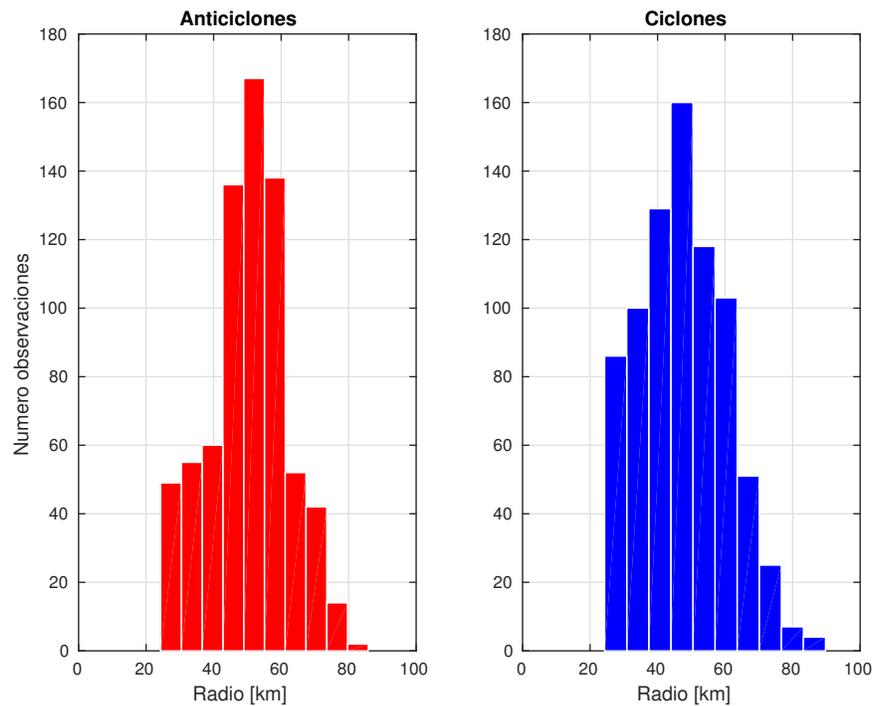


Figura 4.11: Distribución del número de remolinos, que interactúan con la DJF, en función del radio de remolinos (a) anticiclónicos y (b) ciclónicos.

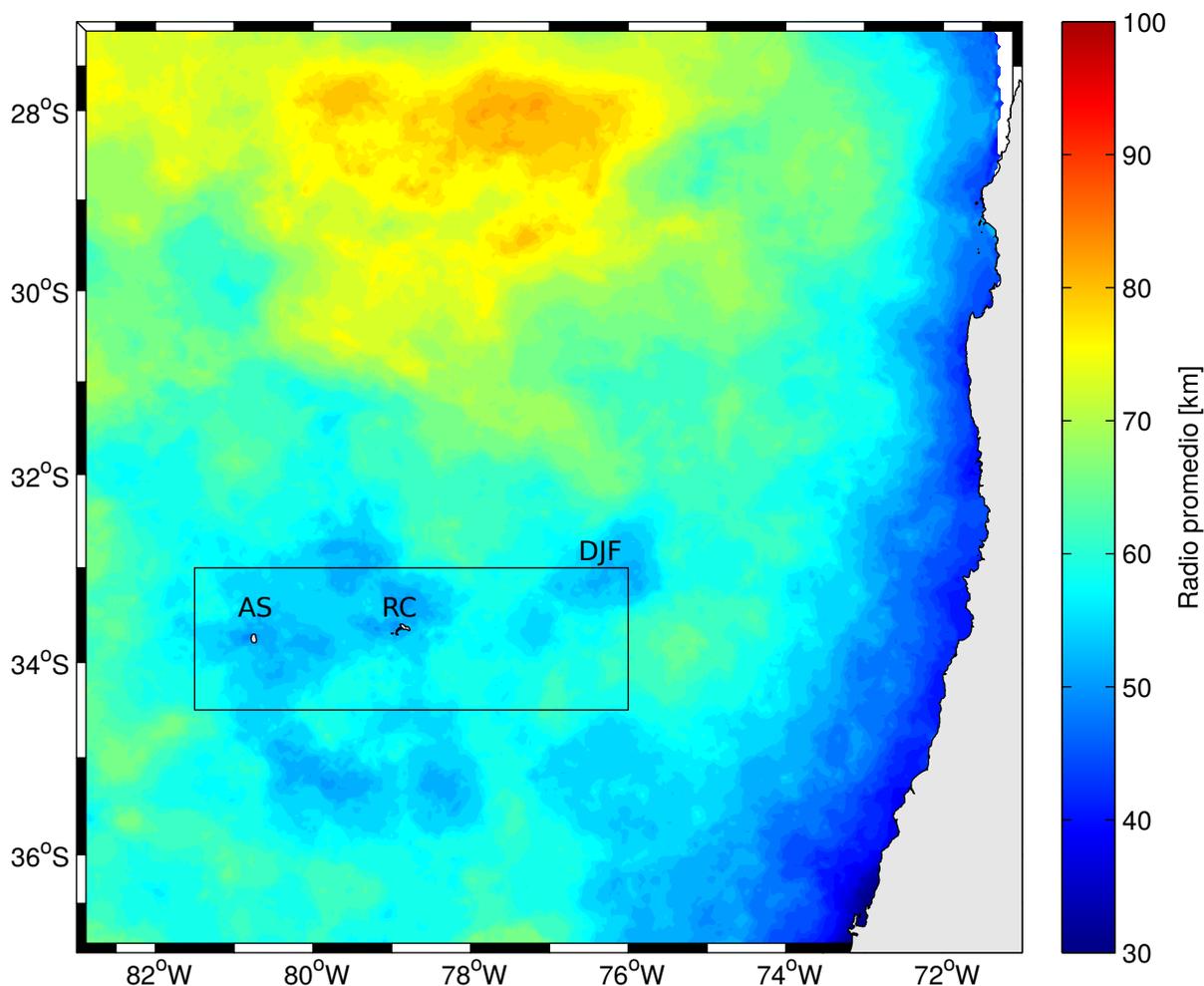


Figura 4.12: Distribución espacial del radio promedio de los remolinos para los 8 años de simulación

tencial, esto induce un cambio en la vorticidad relativa en ambos costados del remolino. Este efecto provoca un desplazamiento hacia el oeste, tanto para los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, pero también se produce un pequeño desplazamiento meridional, los ciclones tienen una desviación hacia los polos, mientras los anticiclones tienen una desviación hacia el ecuador (Cushman-Roisin, 1994). Las direcciones de las trayectorias de los remolinos según su polaridad ya han sido documentados y han verificado lo expuesto anteriormente, aunque para los ciclones se ha observado un desplazamiento más zonal (Morrow et al., 2004 ; Chaigneau y Pizarro, 2005). Los resultados de este estudio concuerdan con la teoría y con estudios anteriores.

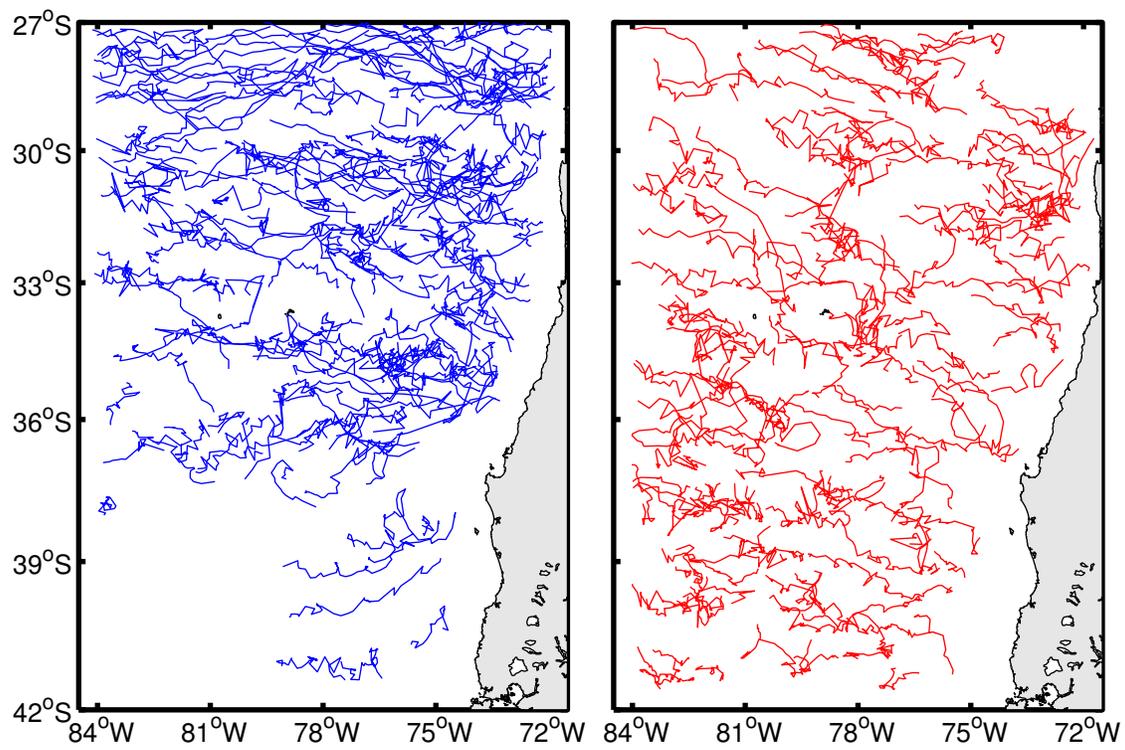


Figura 4.13: Trayectorias de los remolinos ciclónicos (izquierda) y anticiclónicos (derecha) para el período 2001-2008.

## 4.2. Remolinos Subsuperficiales

En esta sección se analiza la variabilidad temporal de los remolinos de mesoscala basada en la profundidad de la isoterma de  $8^{\circ}\text{C}$  ( $P_8$ ), la profundidad de la isoterma de  $11^{\circ}\text{C}$  ( $P_{11}$ ) y la diferencia entre ambas isotermas ( $\Delta P_t$ ), para establecer las bandas de frecuencia de mesoscala más importantes a través del método MTM-SVD. Los espectros de varianza fraccional local obtenidos para  $P_8$ ,  $P_{11}$  y  $\Delta P_t$  se muestran en la Figura 4.14. En este análisis no se tomaron en cuenta las variaciones con períodos mayores al semi-anual, ya que este estudio se enfoca en la variabilidad de mesoscala que comúnmente se asocia con una variabilidad temporal con períodos de uno a seis meses. Los ciclos más significativos para  $P_8$  fueron la banda semianual, con un período de  $\sim 170$  días (varianza significativa  $>90\%$ ) y la banda estacional, con un período de  $\sim 120$  días ( $>50\%$ ). Para  $P_{11}$ , se encontraron las bandas semianual, con un período de  $\sim 182$  días ( $>95\%$ ) y la banda estacional,  $\sim 130$  días ( $>80\%$ ). Estos resultados son muy consistentes con los resultados de Andrade et al., (2014), en los que se encuentran que  $P_8$  presenta las bandas semianual y estacional con fluctuaciones significativas en los periodos de  $\sim 195$  ( $>95\%$ ) y  $\sim 127$  ( $>80\%$ ) días, respectivamente. Para  $P_{11}$  se identificaron incrementos significativos de energía en la banda semianual,  $\sim 193$  días ( $>95\%$ ) y estacional,  $\sim 126$  días ( $>95\%$ ).

Gordon et al., (2002), utilizando datos hidrográficos determinaron la presencia de remolinos subsuperficiales originados en la Corriente Tsushima en Japón, definiendo un criterio de identificación para un remolino subsuperficial dado por la separación de las isotermas de  $8^{\circ}\text{C}$  y  $11^{\circ}\text{C}$  para valores mayores a 80 m. Por ello, en este estudio se analizó la variabilidad temporal de la diferencia de profundidad entre estas isotermas ( $\Delta P_t$ ), los resultados del espectro de varianza fraccional local se muestran en la Figura 4.15. Se encuentran la banda semianual, con un período de  $\sim 170$  días ( $>80\%$ ) y la banda estacional  $\sim 120$  días ( $>80\%$ ). El hecho de que se observen ciclos en las mismas bandas para los tres espectros de varianza fraccional ( $P_8$ ,  $P_{11}$  y  $\Delta P_t$ ), sugiere que los procesos involucrados en los ciclos de esas bandas, que afectan ambas isotermas, podrían reflejar las perturbaciones asociadas tanto al paso de ondas de Rossby como al paso de

remolinos de mesoscala. A través de la reconstrucción espacial de  $P_8$  y  $P_{11}$ , Andrade et al., (2014) logra establecer que los ciclos mencionados están más relacionados con los remolinos de mesoscala que con las Ondas de Rossby.

Ya que  $\Delta P_t$  presenta ciclos muy similares a  $P_8$  y  $P_{11}$ , se utilizaron mapas mensuales de  $\Delta P_t$  para identificar los remolinos subsuperficiales que interactúan con la DJF. El primer desafío fue establecer un valor umbral de  $\Delta P_t$  para definir cuándo estamos en presencia de un remolino subsuperficial anticiclónico en la zona de estudio. Se realizaron pruebas de sensibilidad para evaluar posibles valores umbrales. En la Figura 4.15 se muestra el promedio mensual de  $\Delta P_t$  correspondiente al mes de febrero del 2005, con umbrales  $>180$  m (izquierda),  $>190$  m (centro) y  $>200$  m (derecha). Con el primer umbral (izquierda) no se aprecian patrones claros de remolinos, el segundo umbral (centro) entrega mejores resultados pero aún las estructuras no son del todo claras. Finalmente, se escogió el último umbral (derecha) en donde los patrones son más claros y si comparamos este umbral ( $> 200$  m) con otras variables como vorticidad relativa (Figura 4.18, abajo), los patrones de umbral coinciden con patrones de vorticidad relativa positiva que corresponden a remolinos anticiclónicos, o con variables como la salinidad (Figura 4.19, abajo), los mayores niveles de salinidad, que son una característica propia de los remolinos anticiclónicos subsuperficiales, coinciden con las estructuras destacadas con un umbral  $>200$  m.

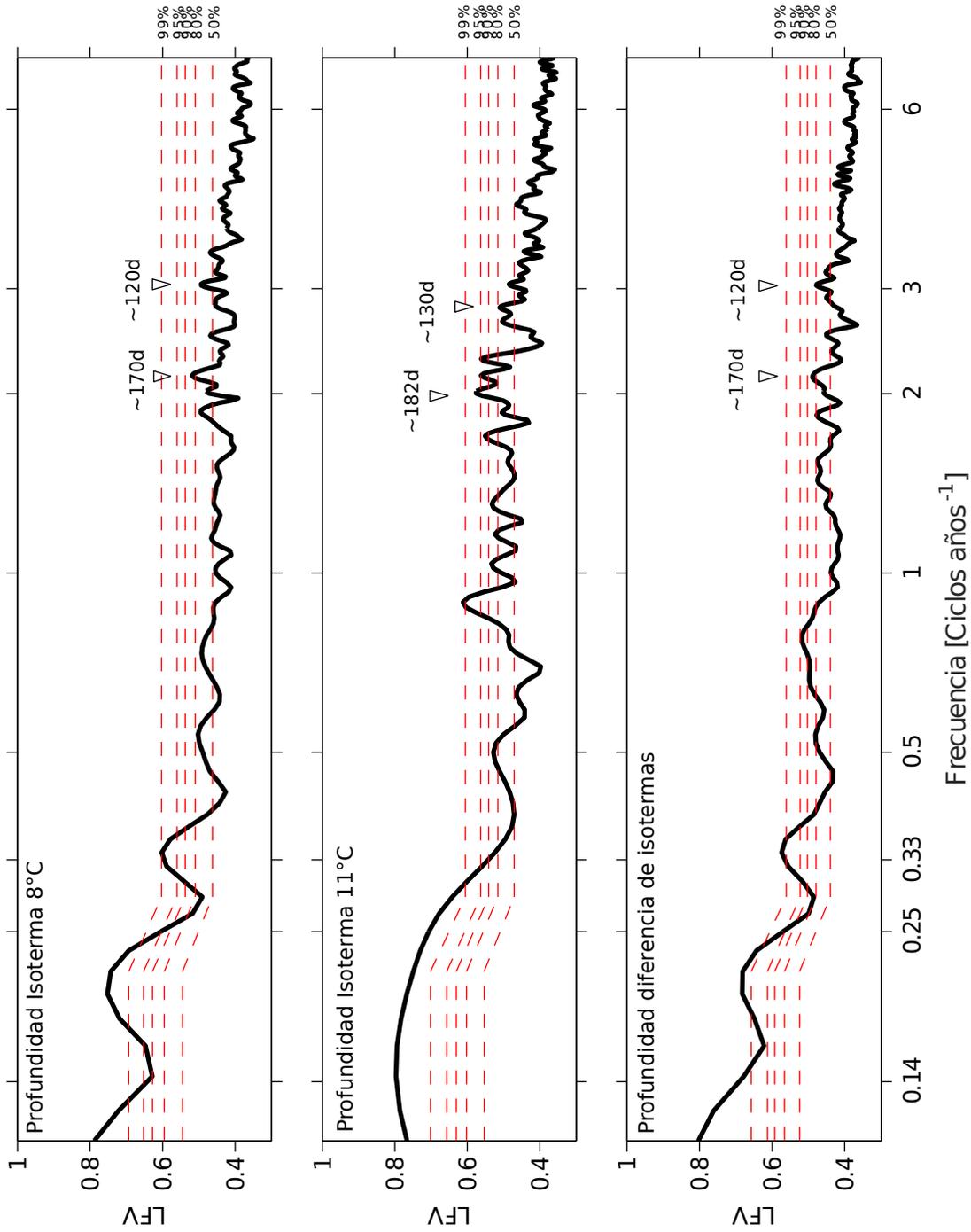


Figura 4.14: Espectros de varianza fraccional local de  $P_8$  (arriba),  $P_{11}$  (medio) y  $\Delta P_t$  (abajo) con niveles de confianza de 50 %, 80 %, 90 %, 95 %, 99 %.

Al usar esta variable como método de detección de remolinos subsuperficiales anticiclónicos hay que tener cuidado con la precisión del umbral. Cada remolino subsuperficial tiene características propias y determinar un umbral universal podría generar problemas, ya que en sus límites horizontales los remolinos achatan sus lados, siendo el umbral en los bordes variable respecto al centro del remolino. En la figura 4.16 se observa el perfil vertical de vorticidad relativa en la transecta T1 (observada en la Figura 4.15), los dos remolinos identificados por  $\Delta P_t$  en esta transecta se observan en el perfil vertical, uno esta siendo deformado por RC y el otro se observa en el borde del lado derecho de la Figura 4.16. Al observar los umbrales (lineas negras verticales en la figura) de manera vertical podemos ver que el umbral escogido en este estudio ( $>200$  m) es el que más se aproxima a los bordes de los remolinos subsuperficiales. Lo mismo se observa en el perfil vertical de la transecta T2 en la Figura 4.17. Así, este método sí ayuda a identificar remolinos subsuperficiales anticiclónicos, pero es necesario respaldar la información obtenida por  $\Delta P_t$  con otra variable como por ejemplo la vorticidad relativa o salinidad, como lo muestra la Figura 4.18 y 4.19.

Cabe destacar que se utilizó la isoterma de  $11^\circ\text{C}$  como la isoterma con mayor deflexión en la parte superior de los remolinos anticiclónicos subsuperficiales, por lo documentado en la literatura (Gordon et al., 2011; Andrade et al., 2014), aunque las salidas de este modelo indicaban que la isoterma de  $12^\circ\text{C}$  presentaba una mayor deflexión (Figura 3.4). En el futuro se podría tratar de implementar un método como el presentado, donde estén incluidos los aspectos antes mencionados.

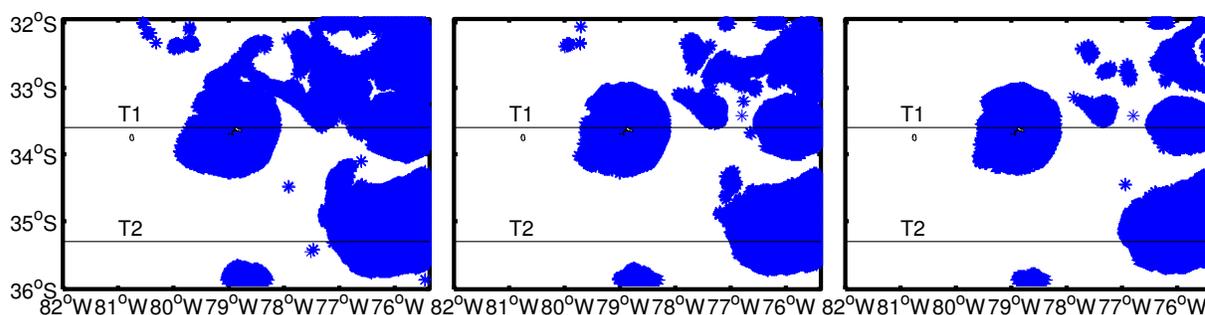


Figura 4.15: Pruebas de sensibilidad del umbral para  $\Delta P_t$ , con umbrales  $>180$  m (izquierda),  $>190$  m (centro) y  $>200$  m (derecha). Las líneas negras corresponden a las transectas T1 y T2.

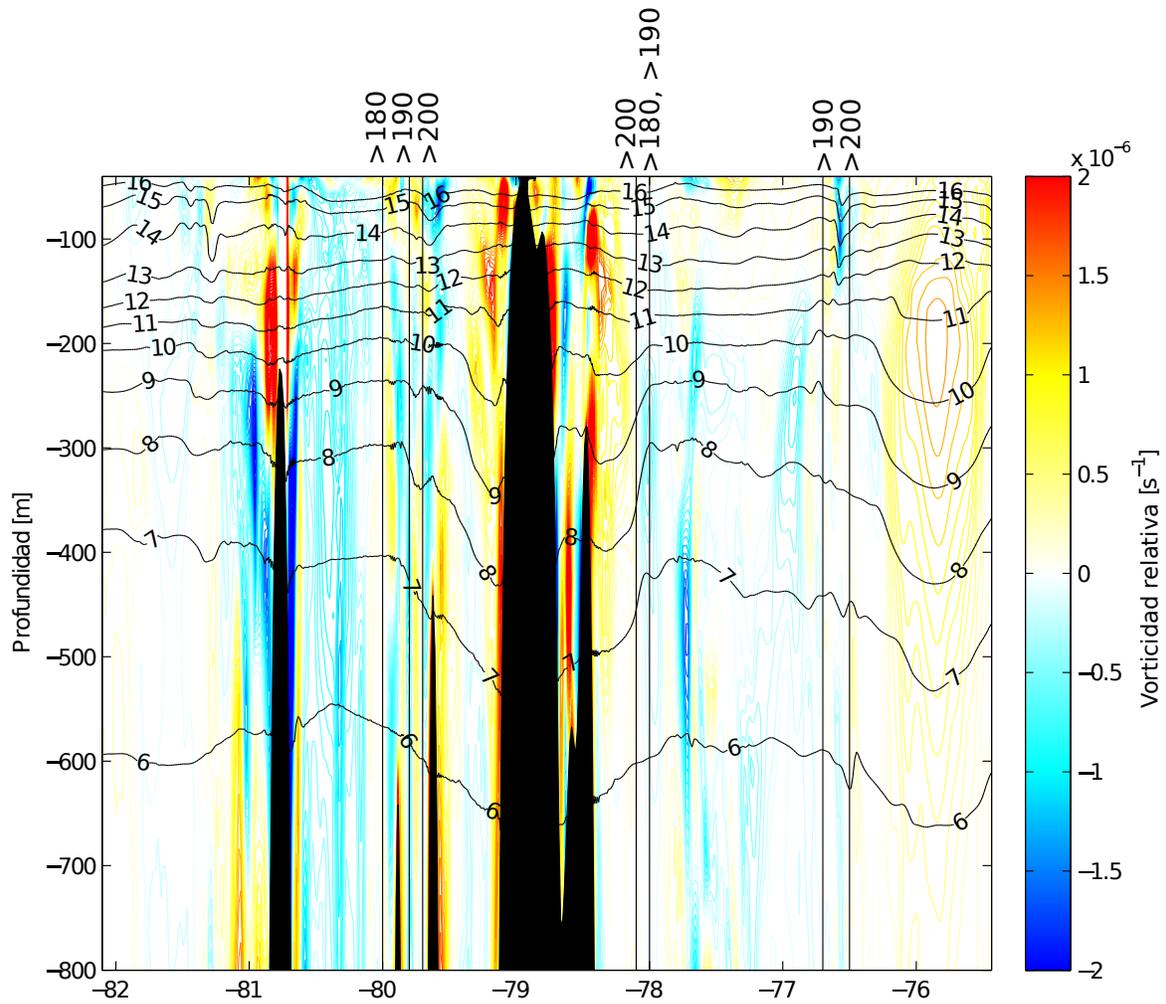


Figura 4.16: Perfil vertical de vorticidad relativa en la transecta T1. Los colores cálidos están asociados a remolinos anticiclónicos, mientras los colores fríos a los ciclónicos. Los colores más intensos corresponden al núcleo de los remolinos, el anticiclón al estar siendo deformado no presenta un núcleo uniforme. Los umbrales del índice isotermal (líneas verticales negras) delimitan los bordes horizontales de los remolinos anticiclónicos subsuperficiales detectados por el índice. Las curvas negras indican las isotermas ( $^{\circ}\text{C}$ ).

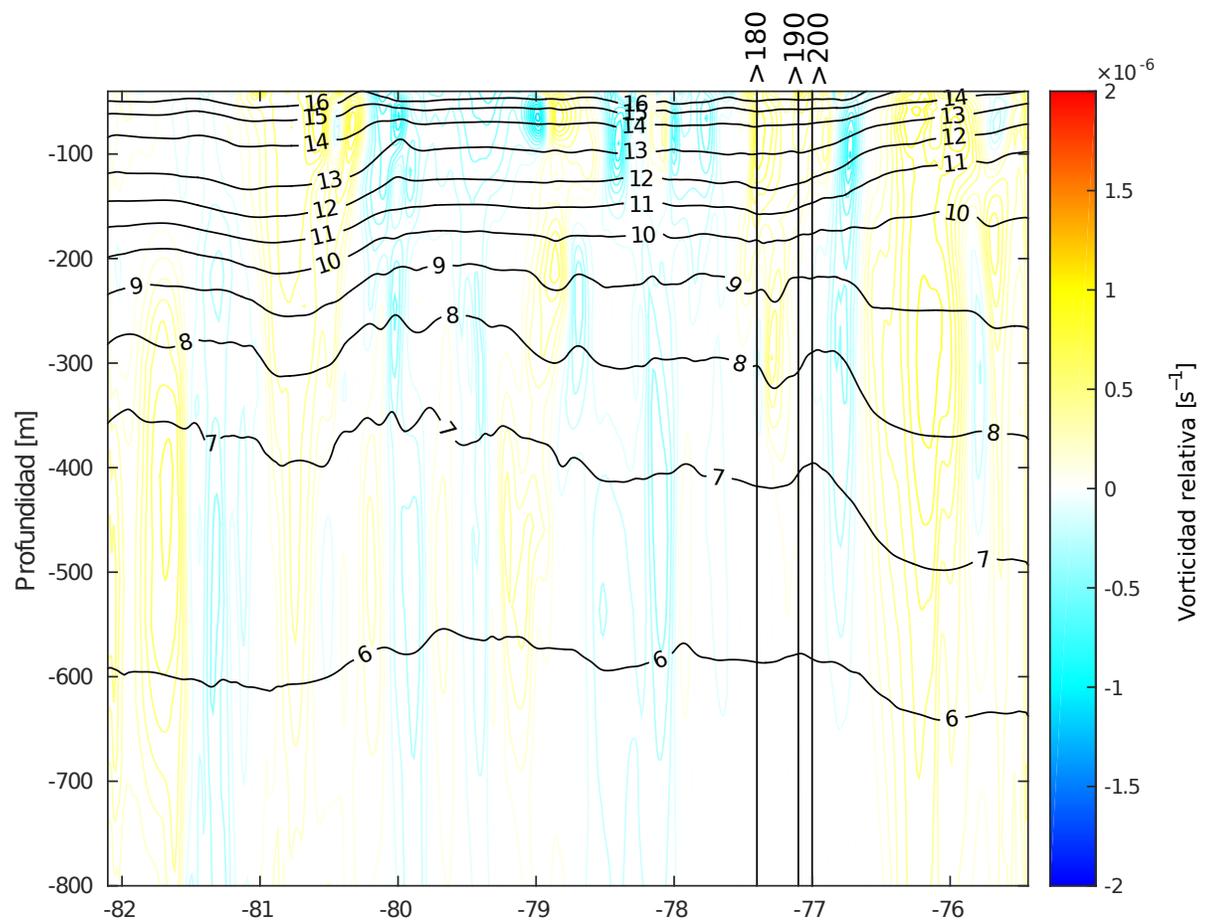


Figura 4.17: Similar a 4.16 pero para la transecta T2.

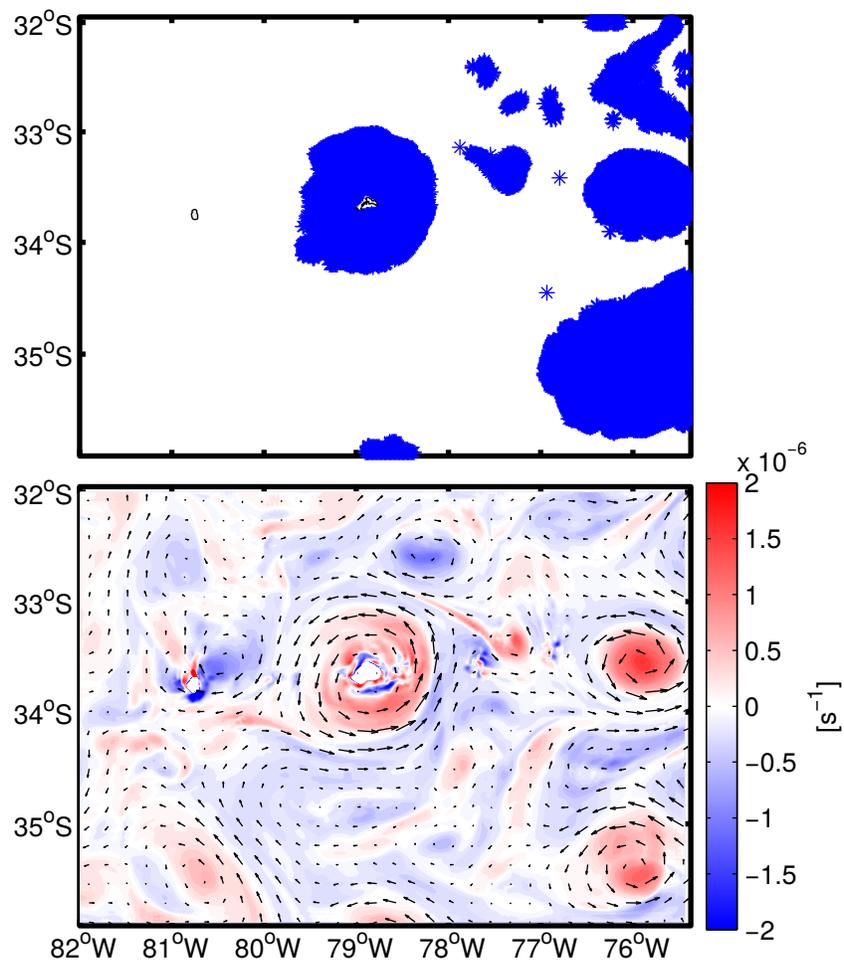


Figura 4.18: Comparación entre estructuras detectadas con el umbral de  $\Delta P_t > 200$  m (arriba) y vorticidad relativa promediada entre los 150 y 400 m de profundidad (abajo) para febrero del 2005. Los colores rojos están asociados a Ra.

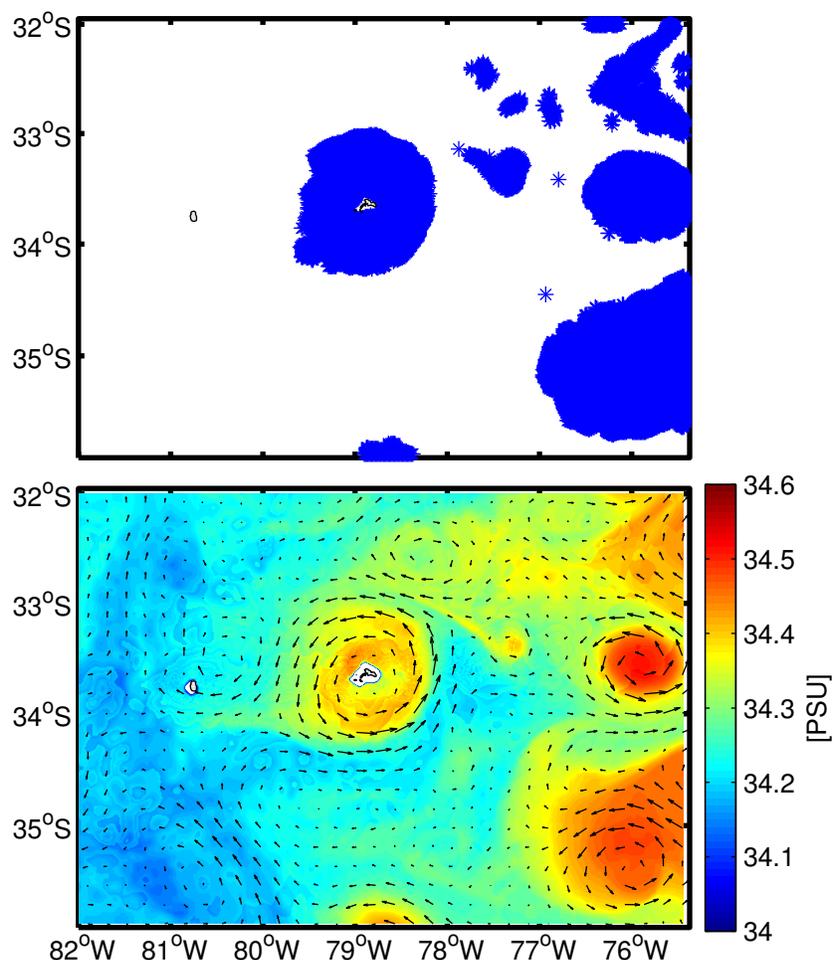


Figura 4.19: Comparación entre estructuras detectadas con el umbral de  $\Delta P_t > 200$  m (arriba) y el campo de salinidad promediada entre los 150 y 400 m de profundidad (abajo) para febrero del 2005. Los colores más cálidos están asociados a Ra.

## Caracterización de casos seleccionados

El primer caso de estudio corresponde a enero del año 2002, durante ese mes se identificaron tres remolinos que interactúan con la DJF: dos remolinos ciclónicos y uno anticiclónico (Figura 4.20). El ciclón de 28 km de radio que interactúa con la parte este de la isla RC (Ciclón 1) sufre deformaciones ya que al interactuar directamente con la isla, el remolino choca, parte de él se destruye y/o deforma, mientras que el remolino ciclónico de 42 km de radio (Ciclón 2) y el anticiclón de 35 km de radio que interactúan con la parte sur de la DJF no sufren deformaciones (no se destruyen ni se deforman). Los tres remolinos son superficiales, de tal manera que el algoritmo fue capaz de identificarlos. Los perfiles verticales de la vorticidad relativa de los 3 remolinos

superficiales del caso 2002 se observan en la Figura 4.22. Los tres remolinos presentan sus núcleos (colores más intensos en la figura) sobre los 100 m y tienen una extensión vertical hasta  $\sim 400$  m.

El segundo caso de estudio corresponde a enero del año 2005. Se destaca la presencia de dos remolinos que interactúan con la DJF. Un remolino subsuperficial anticiclónico (colores rojos) de 61 km de radio (proviniente de la costa chilena) que interactúa con la isla RC y se localiza sobre la isla alrededor de dos meses, luego sigue su trayectoria hacia el noroeste. A pesar de ser un remolino subsuperficial, tiene una señal notoria en superficie que pudo ser detectada por el algoritmo de detección automatizado de remolinos superficiales. Este error del algoritmo de identificación superficial indica que hay una sobreestimación de la cantidad de remolinos superficiales detectados, ya que no discrimina cuáles son remolinos subsuperficiales con señal en superficie y cuáles son netamente superficiales, y también subestima la cantidad total de remolinos, ya que no detecta adecuadamente los remolinos subsuperficiales, solo detecta los remolinos subsuperficiales lo bastante grande y someros como para tener una expresión superficial. Un segundo remolino es identificado, un ciclón (colores azules) superficial con un radio de 44 km, que interactúa con el lado norte de la isla AS, sin sufrir deformaciones. Los perfiles verticales de la vorticidad relativa de estos dos remolinos se observan en la Figura 4.23. El remolino ciclónico superficial presenta su núcleo sobre los 100 m, mientras que el anticiclón subsuperficial no presenta un núcleo claro, ya que está siendo deformado por la isla RC.

Lo interesante de los casos seleccionados, es que se podrá evaluar la diferencia del impacto en la distribución y el crecimiento de estadios larvales de desarrollo, cuando un remolino se deforma al interactuar con una isla y otro no.

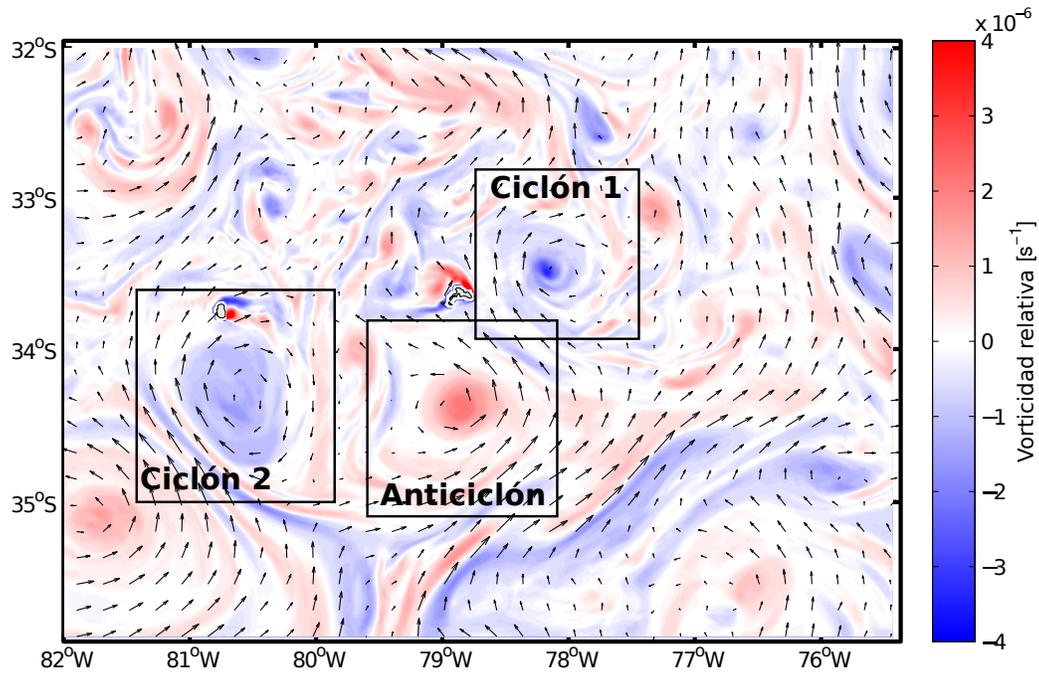


Figura 4.20: Mapa de vorticidad relativa que representa los remolinos estudiados del Caso 1 correspondiente al mes de octubre del 2002: Ciclón 1, Ciclón 2 y Anticiclón.

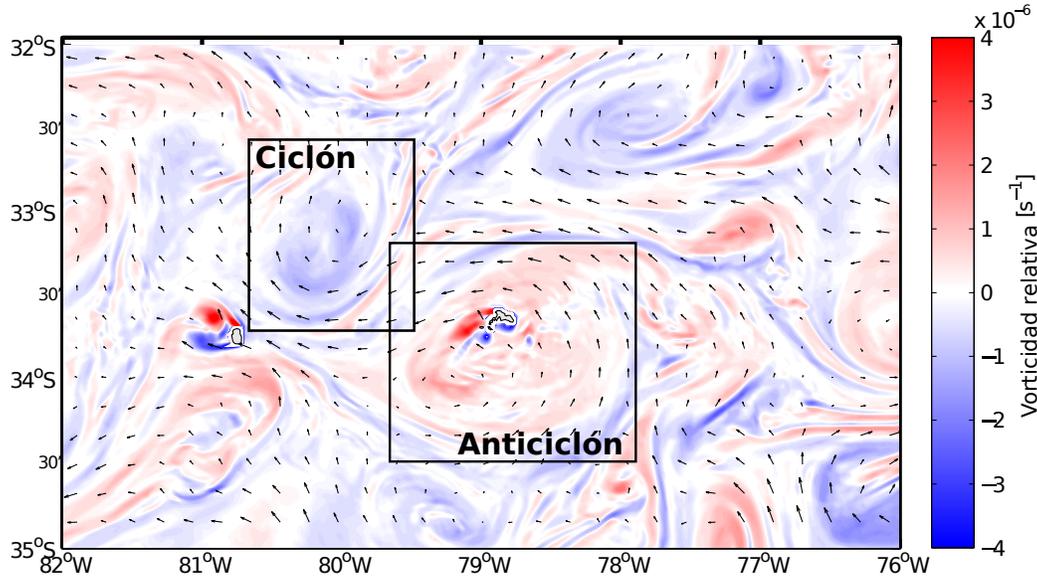


Figura 4.21: Mapa de vorticidad relativa que representa los remolinos estudiados del Caso 2 correspondiente al mes de enero del 2005: Ciclón y Anticiclón.

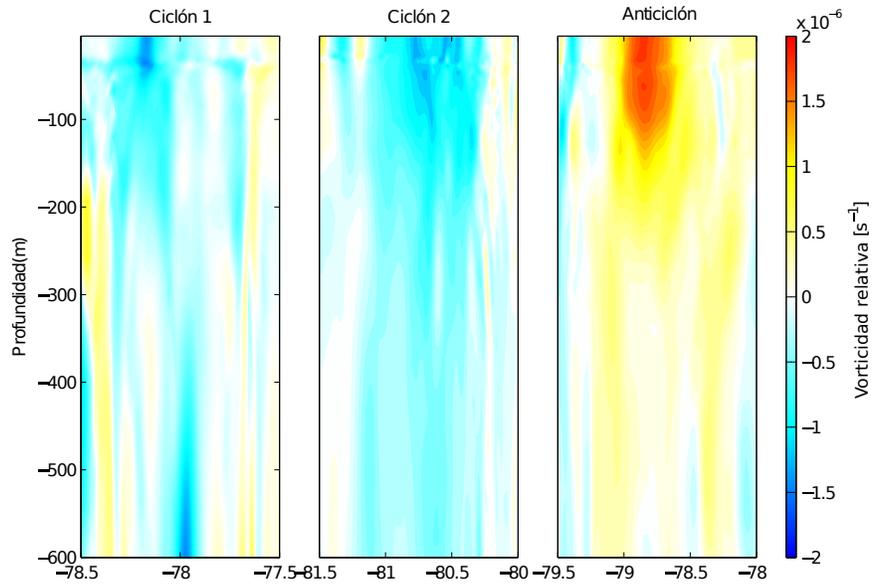


Figura 4.22: Perfiles verticales de vorticidad asociados a los remolinos Ciclón 1 (izquierda), Ciclón 2 (centro) y anticiclónico (derecha) del caso 2002. Los colores representan la vorticidad relativa.

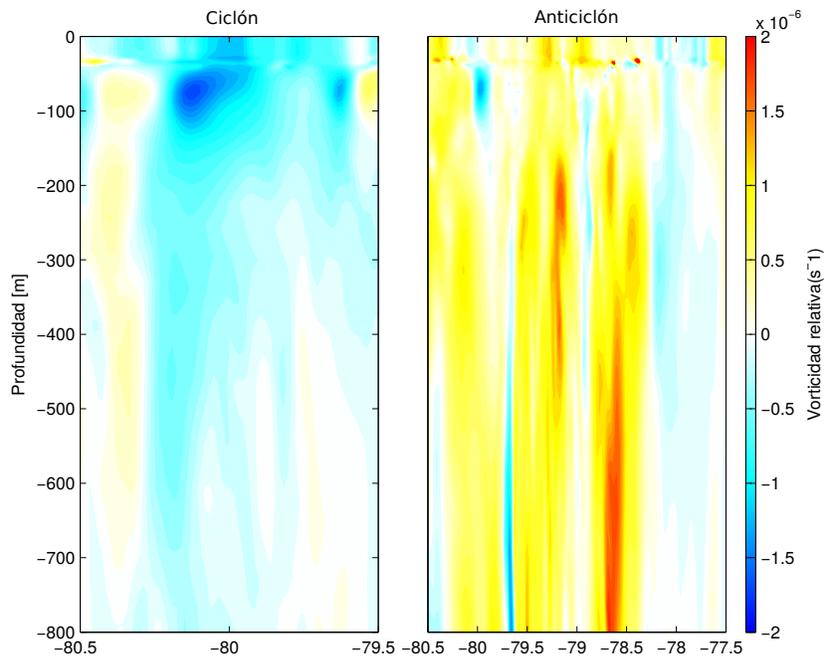


Figura 4.23: Perfiles verticales de vorticidad asociados a los remolinos ciclónico (izquierda) y anticiclónico subsuperficial (derecha) caso 2005. Los colores representan la vorticidad relativa.

### 4.3. Modelo Basado en Individuos (IBM)

Se acopló al IBM de estadios larvales de organismos planctónicos con diferentes estrategias biológicas, el modelo hidrodinámico de la DJF. Se estudió el impacto de los remolinos de mesoscala en el crecimiento y la distribución en el sistema. Se realizaron 3 experimentos de simulación donde se evaluaron 2 estrategias de migración vertical y un experimento control, además se evaluó el crecimiento de los organismos en los remolinos de mesoscala y en las zonas con mayor agregación de partículas. Los resultados obtenidos de la modelación biofísica sobre los patrones de distribución horizontal y crecimiento a los 20, 30 y 40 días de simulación de los 3 experimentos se presentan a continuación.

#### Distribución Horizontal

##### Caso 2002

Los patrones de distribución horizontal del caso 2002 se muestran en la Figura 4.24. Transcurridos 20 y 30 días de la simulación, en los tres experimentos, las partículas que se quedan en el sistema de la DJF se organizan alrededor de las estructuras de mesoscala y siguen casi las mismas distribuciones, lo que varía en los experimentos son los porcentajes de partículas agregadas. Los remolinos (Ciclón 2 y Anticiclón) que no están interactuando directamente con los montes e islas (es decir, no se deforman) agrupan los individuos cerca de sus bordes, mientras que las partículas agrupadas en el Ciclón 1, el cual sufre deformación al estar interactuando con el S2, se distribuyen no solo en los bordes del Ciclón 1 sino en el centro de éste, presentando una forma de espiral dentro del Ciclón 1. A los 40 días de simulación el porcentaje de partículas que se queda en el sistema de la DJF baja en los 3 experimentos, siendo el comportamiento pasivo (CP) el que presenta los menores porcentajes, mientras que el patrón de la migración diurna nictimeral profunda (MNP) y la migración diurna nictimeral superficial (MNS) de las partículas actúan como mecanismos que favorecen los altos porcentajes de retención en la DJF.

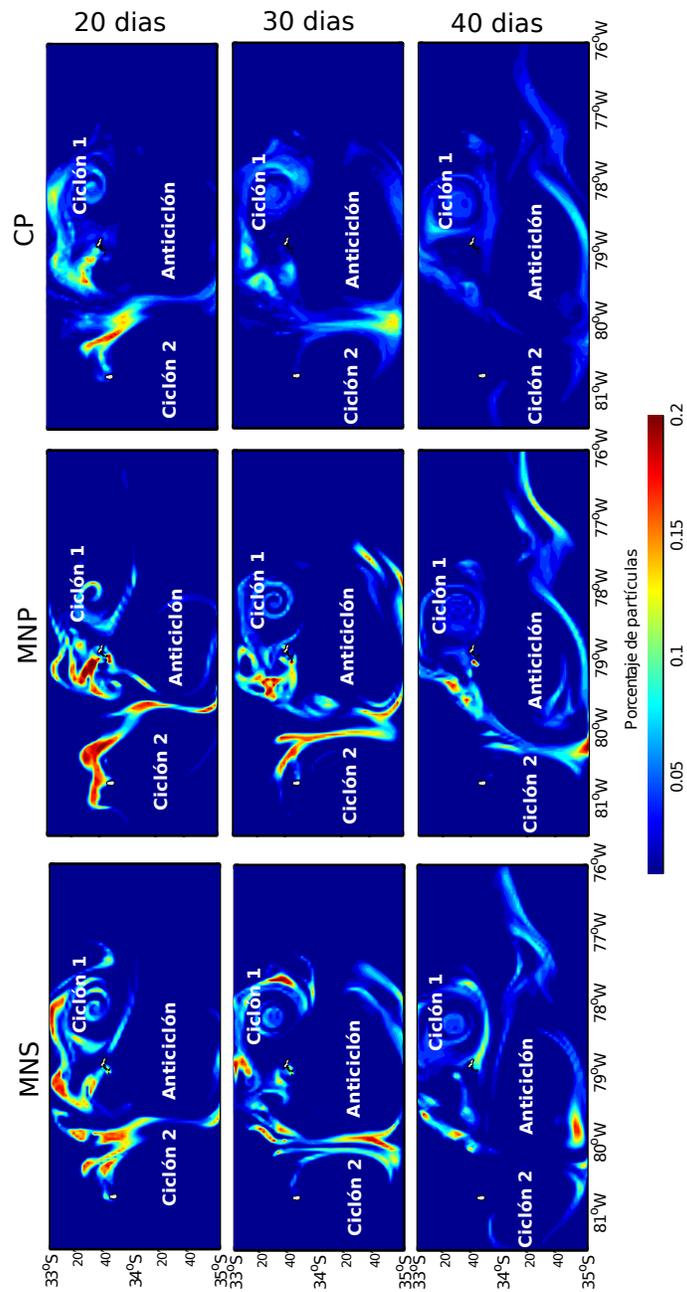


Figura 4.24: Patrones de distribución transcurridos 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) días de simulación, la primera columna corresponde al experimento MNS, la segunda columna el experimento MNP y la tercera columna el CP. Los colores indican el porcentaje de partículas en función de la cantidad total lanzadas (29.000), pero descontando las partículas muertas y las que salen del sistema de la DJF.

Los porcentajes más altos de concentración de partículas están asociados a las partículas con MNP, seguido de las partículas con MNS. Estos altos porcentajes se acoplan mejor al flujo y a las estructuras presentes durante todos los pasos de tiempo evaluados. Mientras que las partículas en el experimento con CP presentan concentraciones más bajas de partículas y sufren una mayor dispersión y advección. Es decir, los porcentajes de partículas aumentan en el experimento con MNP y con MNS con respecto al CP. Durante todo el período de evaluación, los porcentajes más altos de partículas no estuvieron localizados en el interior de los remolinos, como se esperaba, si no más bien en las “estelas” de vorticidad y en estructuras de submesoscala. Estas estructuras de submesoscala observadas en la Figura 4.25 (izquierda) son conocidas como calles de vórtices de von Kármán y se forman por la incidencia del flujo con un obstáculo orográfico como una isla (Atkinson, 1981; Beggs et al., 2004). Estructuras similares, formadas por esta interacción (flujo-isla) han sido documentadas como promotoras del movimiento vertical de nutrientes, generando altas concentraciones de clorofila en las aguas circundantes (Aristegui et al., 1997; Sangrà et al., 2007, Andrade et al., 2014).

Al final de la evaluación (al día 40), los experimentos con comportamiento biológico (MNS y MNP) aportan mayor agregación de partículas al sistema de la DJF que el experimento con CP.

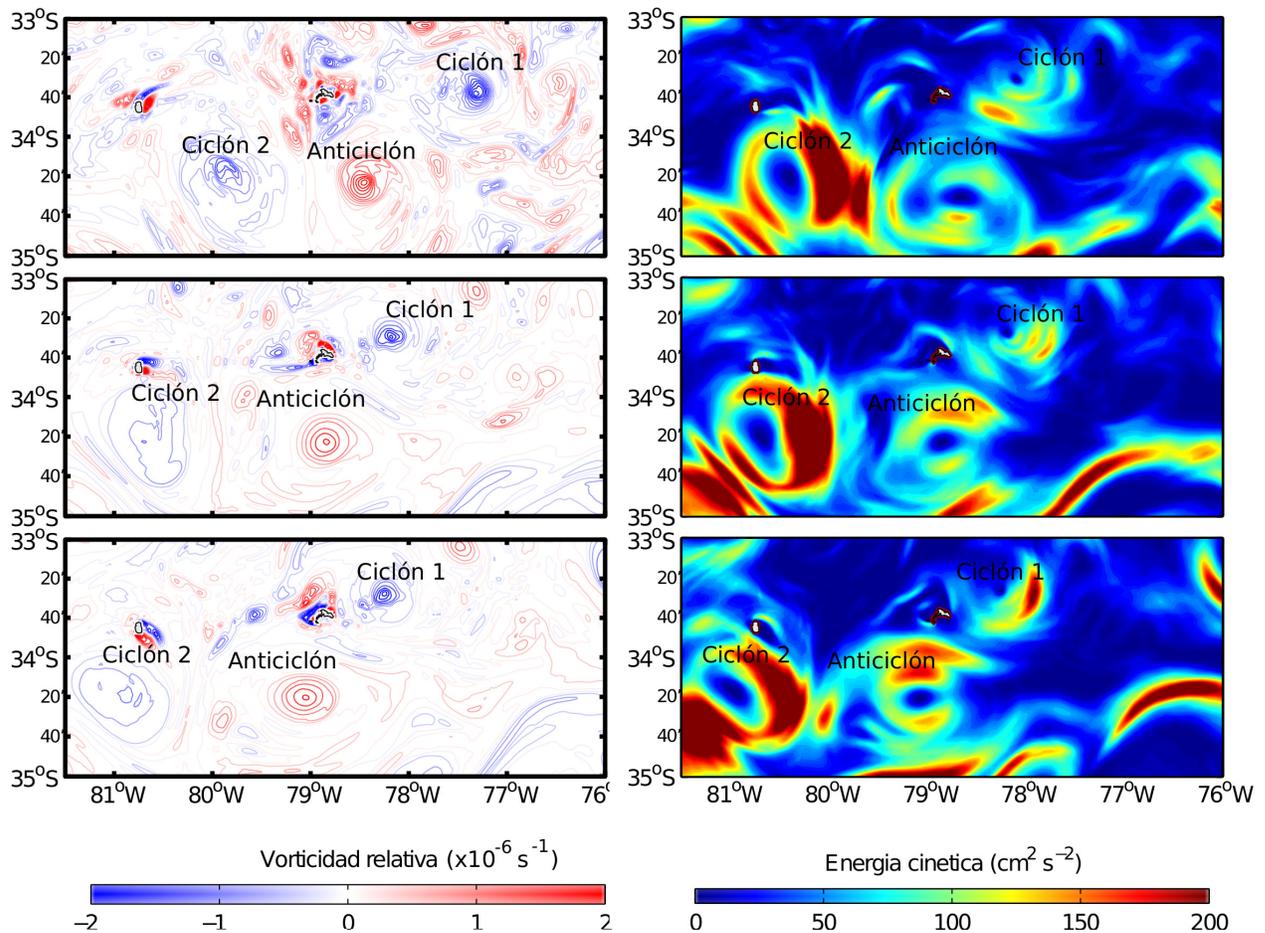


Figura 4.25: Mapas de contornos de vorticidad relativa (izquierda) y EKE (derecha) en los días 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) del caso 2002. Se indican los remolinos estudiados.

Los sectores en donde los porcentajes de partículas son altos coinciden con los sectores en donde la EKE es muy baja o nula, mientras que los sectores con valores más bajos o nulos de partículas coinciden con valores altos de EKE (Figura 4.25, derecha), este patrón se observa para todos los experimentos. Esto sugiere que los patrones de distribución horizontal podrían estar modulados por la EKE de los remolinos, hecho que ha sido observado en los montes submarinos de la Quebrada Challenger en el Pacífico Este, en donde la EKE no contribuye de forma positiva a la agregación de partículas (Parada et al., en revisión). Otro factor a considerar sobre la agregación de partículas en estudios futuros, es la contribución de la convergencia del flujo. McWilliams (2010) expone que el flujo de mesoescala genera regiones de convergencia (y divergencia) horizontal que, a

su vez, genera regiones frontales formando estructuras de submesoescala, así la submesoescala es resultado de la transferencia de energía de los flujos de mesoescala. Aunque no es claro si la convergencia pueden contribuir a la agregación o desagregación de partículas (Samuelsen et al., 2012).

### **Caso 2005**

Los patrones de distribución horizontal del caso 2005 se muestran en la Figura 4.26. Al igual que en el caso 2002, el mayor porcentaje de partículas se observa en los patrones de distribución de los experimentos con migración diurna nictimeral superficial (MNS) y migración diurna nictimeral profunda (MNP). En estos experimentos, con comportamiento biológico, las partículas en el remolino anticiclón, asentado en la isla RC, que sufre deformación, distribuye las partículas en su centro, mientras que las partículas en el ciclón que no se deforma se agrupan en los bordes de éste, aunque con bajos porcentajes. En el día 40 un gran porcentaje de partículas ya están fuera del sistema de la DJF (por el lado oeste), siendo mayor la retención en las partículas con MNP, mientras que el experimento con el comportamiento pasivo (CP) sufre mayor dispersión y advección de las partículas por parte del flujo. Al igual que el caso 2002, las zonas con los valores más altos de porcentaje de partículas corresponden a estelas de vorticalidad y a estructuras de submesoescala (Figura 4.27, izquierda) y los sectores en donde los porcentajes de partículas son altos coinciden con los sectores en donde la EKE es muy baja o nula, mientras que los sectores con valores más bajos o nulos de partículas coinciden con valores altos de EKE (Figura 4.27, derecha). Al final de la evaluación, el experimento que aporta mayor agregación de partículas al sistema de la DJF es la MNP.

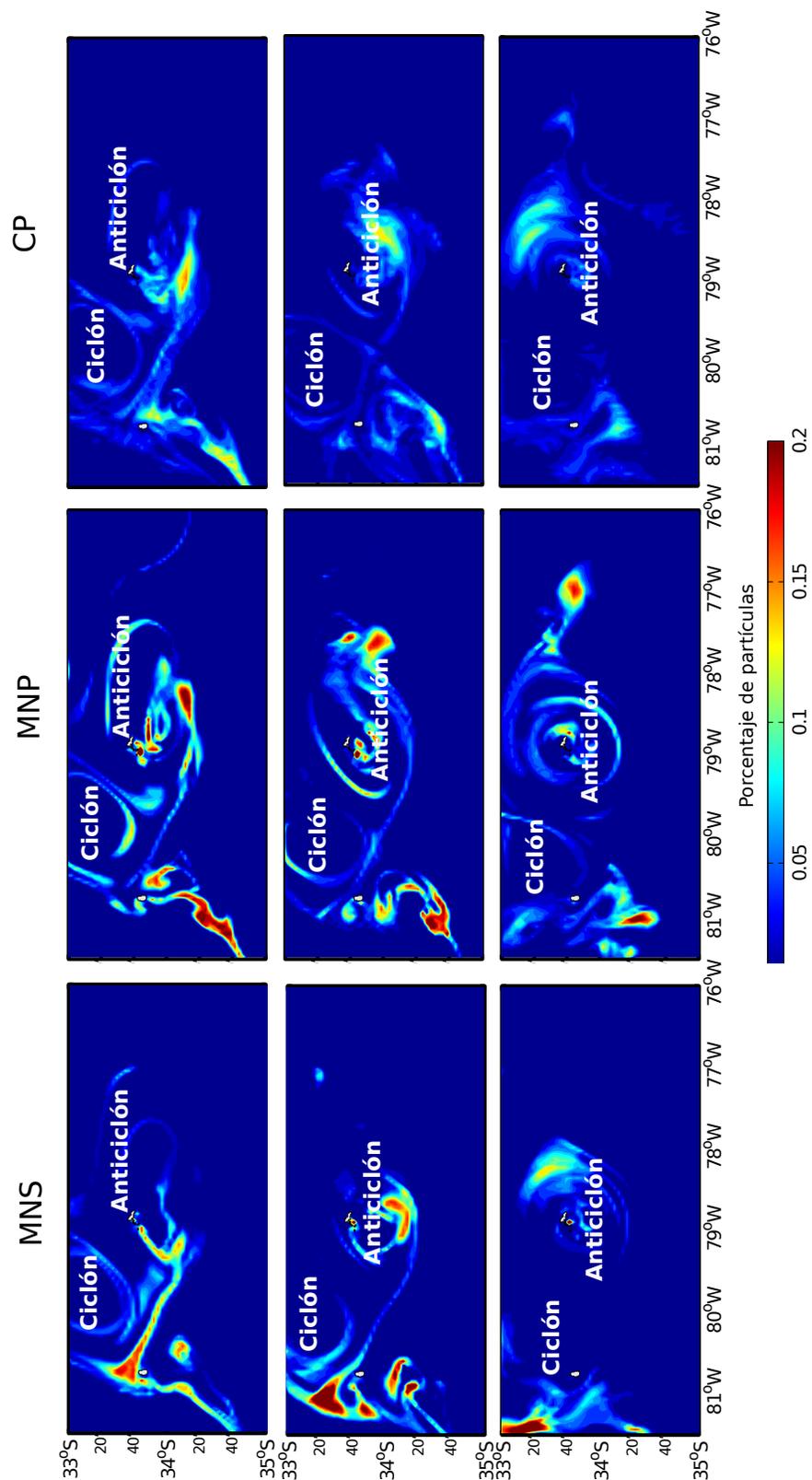


Figura 4.26: Patrones de distribución del caso 2005 transcurridos 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) días de simulación, la primera columna corresponde a la distribución del experimento MNS, la segunda columna representa la distribución del experimento MNP y la tercera columna, el experimento CP. Los colores indican el porcentaje de partículas en función de la cantidad total lanzadas (29.000), pero descontando las partículas muertas y las que salen del sistema de la DJF.

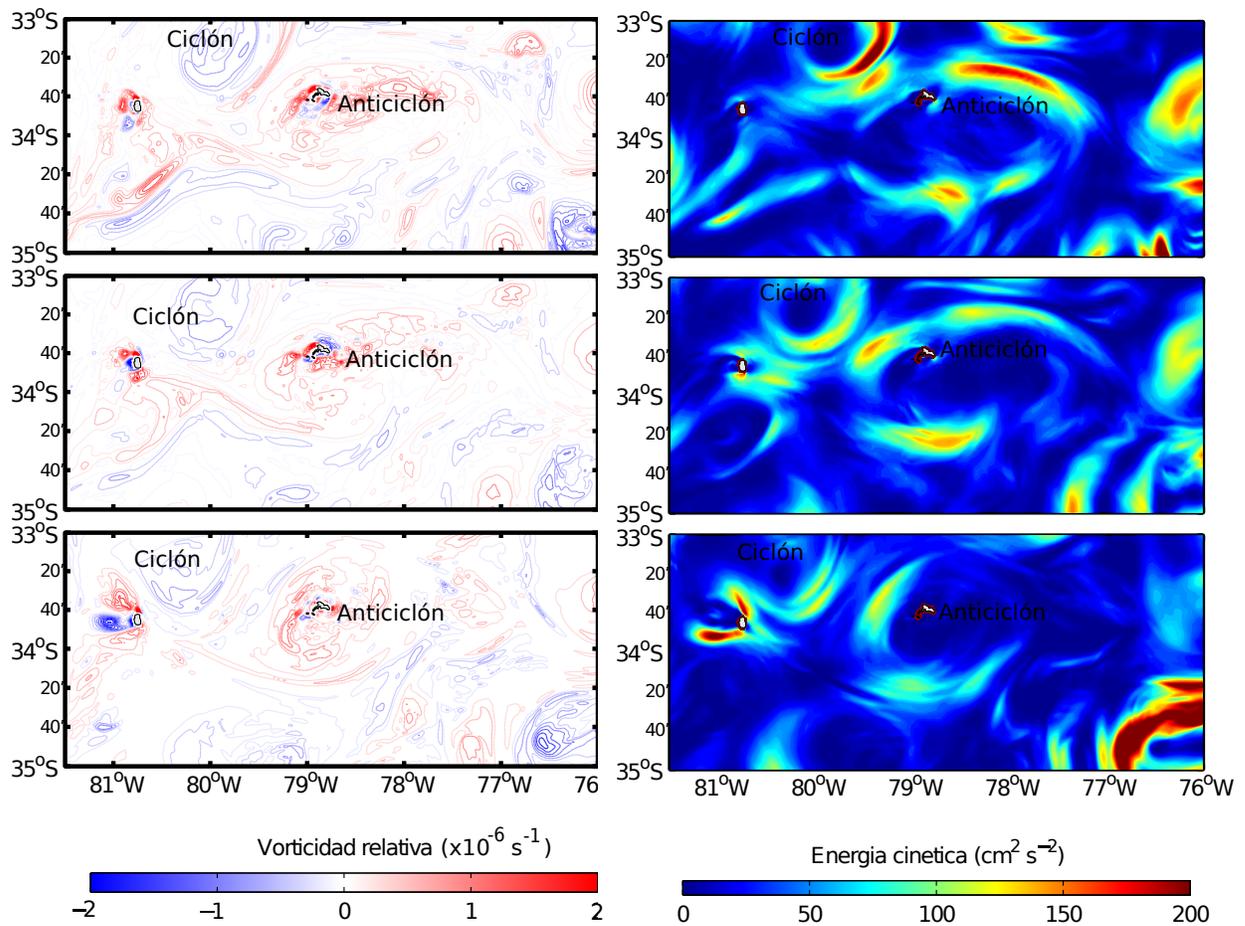


Figura 4.27: Mapas de contornos de vorticidad relativa (izquierda) y EKE (derecha) en los días 20 (primera fila), 30 (segunda fila) y 40 (tercera fila) de simulación del caso 2005. Se indican los remolinos estudiados.

## Distribución Vertical (DV)

Existen diferencias claras al comparar la DV de las larvas, que caen en los remolinos, con comportamiento biológico (MNS y MNP) y las larvas con CP. Los individuos con MNP, se mueven diariamente entre los 10 y 200 metros de profundidad, si las partículas no están experimentando velocidades verticales (del remolino) tan fuertes como para perturbar su rango de migración, las partículas, en un promedio diario, deberían oscilar entorno a los  $\sim 100$  metros y eso es lo que se observa en la Figura 4.28.centro (Caso 2002) y Figura 4.29.centro (Caso 2005). El análisis del promedio diario de la distribución vertical de los organismos en el experimento MNS mostró que los individuos se concentran, aproximadamente, en la mitad del rango impuesto (0-50 m), es decir, a los  $\sim 25$  metros (Figura 4.28.centro, Caso 2002 y Figura 4.29.centro, Caso 2005). Esto indica que las velocidades verticales dentro de los remolinos no están perturbando las distribuciones verticales de las partículas que caen dentro de los remolinos. Este supuesto lo confirman las partículas con CP que caen dentro de los remolinos analizados en ambos casos de estudio (2002 y 2005): independiente del tipo de remolino (superficial, subsuperficial anticiclónico o ciclónico) las partículas con CP se concentran en la superficie, sobre los  $\sim 70$  metros de profundidad (Figura 4.28.centro y 4.29.centro). Esto se debe a que las partículas fueron lanzadas entre la superficie y los 50 metros de profundidad y las velocidades verticales dentro de los remolinos son bajas (del orden de  $10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ) haciendo que las partículas se mantengan cerca de la profundidad lanzada y son levemente perturbadas.

En el caso 2002, en los 3 experimentos, el remolino que agrega más partículas fue el Ciclón 1 y el que agregó menos partículas fue el Ciclón 2, incluso en el experimento CP no hubo agregación en este ciclón. Esto indica que la agregación de partículas asociada a los remolinos está controlada por la cercanía de los remolinos en relación al evento de liberación: el Ciclón 1 se encontró más cercano a las áreas de liberación, mientras que el Anticiclón y el Ciclón 2 están ubicados más alejados del evento (Figura 4.20). Por esta razón el Ciclón 1 logra agregar más partículas. En el caso 2005, ambos remolinos (Ciclón y Anticiclón) están cercanos a las áreas de lanzamiento, aunque el Anticiclón está en algunas áreas de lanzamiento y por ello muestra una mayor agregación de partículas en MNP y CP, pero no en MPS (Figura 4.29). Esto podría explicarse por el hecho de que

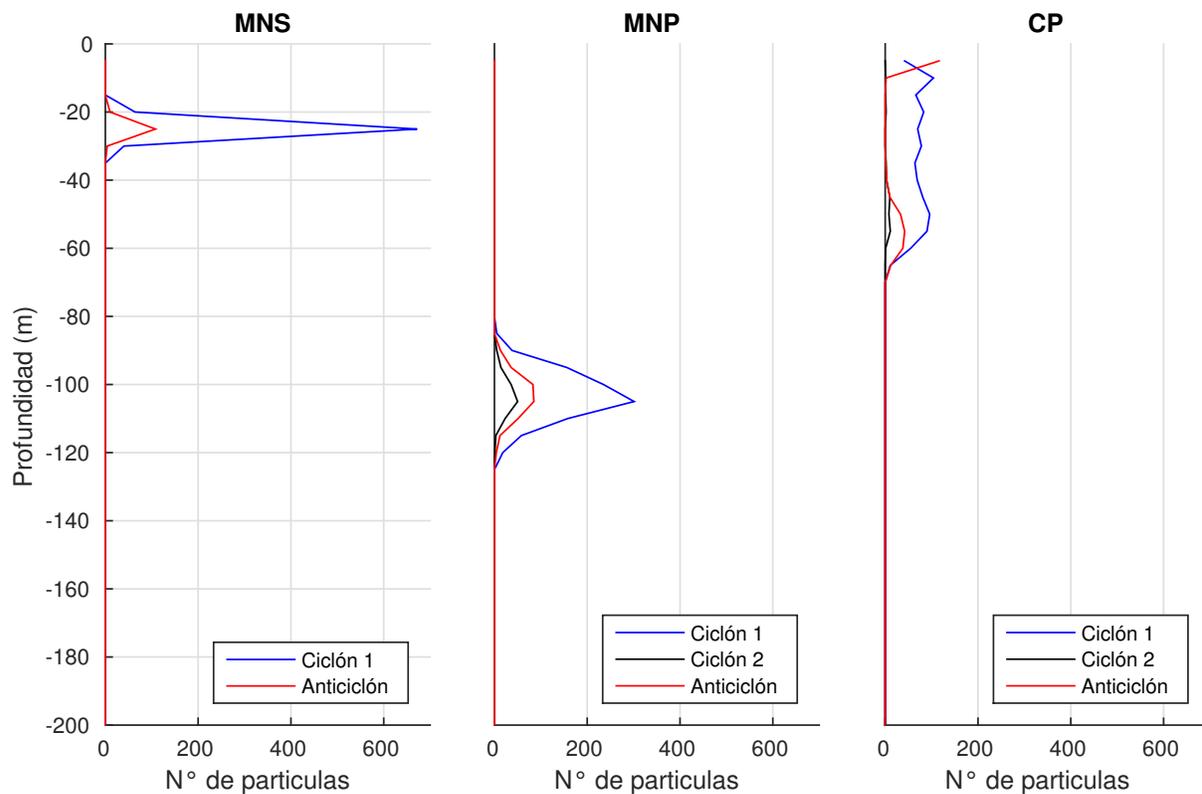


Figura 4.28: Distribución vertical de las partículas en los remolinos del caso 2002 para los experimentos con migración diurna nictimeral superficial MNS (MNS; izquierda), migración diurna nictimeral profunda (MNP; centro) y comportamiento pasivo (CP; derecha).

este remolino Anticiclón es subsuperficial y su impacto en superficie es más débil.

### Crecimiento

Los resultados de las pruebas de sensibilidad de  $T_0$ , para evaluar los GD (ver ecuación 3.4 en metodología) de las partículas que están dentro de los remolinos de los casos de estudio, se presentan en las Tablas 4.3 , 4.4, 4.5. Los valores negativos de GD indican que el medio no alcanza a suplir las necesidades energéticas de los individuos para crecer, quizás migren a otro lugar con mejores condiciones para el crecimiento o mueran.

En las pruebas de sensibilidad de  $T_0$  con los valores de 14°C, 16°C, y 13°C las partículas tienen un desarrollo más eficiente con comportamiento pasivo (CP) y migración diurna nictimeral superficial (MNS) en comparación con las partículas con migración diurna nictimeral profunda (MNP), que en la mayoría de los casos entrega valores negativos de GD. Un  $T_0$  de 13°C, muestra valores muy cercanos de GD entre

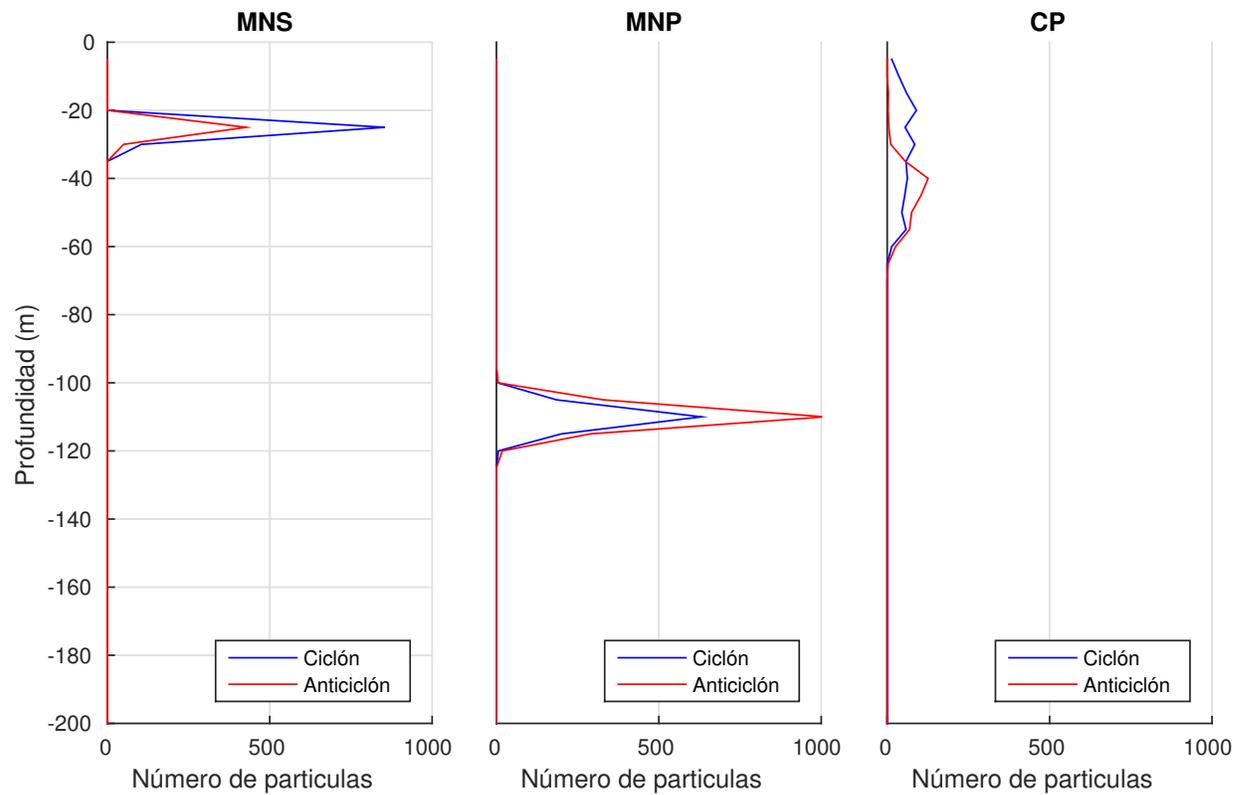


Figura 4.29: Distribución vertical media de las partículas en los remolinos del caso 2005 para los experimentos con migración diurna nictimeral superficial MNS (MNS; izquierda), migración diurna nictimeral profunda (MNP; centro) y comportamiento pasivo (CP; derecha).

CP y MNS, y que entrega mejores condiciones para el crecimiento. Esto implica que sólo en temperaturas mayores de  $13^{\circ}\text{C}$  crecen bien los individuos. Con  $T_0 = 15^{\circ}\text{C}$ , los individuos se desarrollan en condiciones muy frías (desfavorables) en 2002, en especial la MNP, indicando que los individuos no están creciendo, es decir, no se desarrollan bien bajo esas condiciones disminuyendo las probabilidades de sobrevivencia. En cambio, para el 2005 hay mejores condiciones, aunque MNP sigue siendo el menos óptimo para el crecimiento.

Si evaluamos los ciclones que están cercanos a las zonas de lanzamiento (Ciclón 1 en caso 2002 y Ciclón en caso 2005) se ven diferencias considerables dado el mismo  $T_0$  (Tabla 4.4 y 4.5), el ciclón en 2005 presenta mucho mejores GD indicando condiciones de crecimiento más favorables. Esto se podría deber a que estos remolinos ciclónicos no se ubican en el mismo lugar geográfico (Figura 4.20 y 4.21) y no son los mismos meses en donde se evalúa (octubre 2002 y enero 2005) donde las condiciones ambientales de enero son mejores para el crecimiento.

Comparativamente, en todas las evaluaciones de  $T_0$ , la superficie (MNS) ofrece mejores condiciones para el crecimiento en los niveles más profundos (MNP).

Como hemos visto en los resultados de la distribución horizontal, los remolinos no son las estructuras que tienen las mayores agregaciones de partículas, de hecho son muy bajas. Por esto, también se evaluaron los GD en zonas con mayor concentración que los remolinos que serían GD más representativos. Las zonas a evaluar fueron los vórtices de von Kármán (2002) y remolinos de submesoscala (2005), aunque sólo se evaluó el caso 2002 con  $T_0 = 14^{\circ}\text{C}$  y el caso 2005 con  $T_0 = 16^{\circ}\text{C}$  así, los resultados de estos GD sólo son comparables con la Tabla 4.3. Para 2002 los valores de MNS y CP son ligeramente mejores que en los remolinos y MNP sigue entregando valores negativos, es decir, no existe una diferencia importante entre el crecimiento que experimentarán las partículas en estructuras de mesoscala superficiales y submesoscala. Para que las partículas con MNP experimenten un crecimiento óptimo como las partículas con MNS, el  $T_0$  en 2002 para MNP debe ser de  $11.5^{\circ}\text{C}$ , mientras que MNP en 2005 debe tener un  $T_0$  de  $13^{\circ}\text{C}$ , es decir las partículas deben adaptarse al sistema de forma diferente a MNP para tener el mismo crecimiento que MNS. En 2005, los resultados son similares si lo comparamos con el Anticiclón subsuperficial ( $A_s$ ), pero difiere con el Ciclón ( $C$ ), en especial, en la

MNP. Para evaluar la dispersión de los resultados de la Tabla 4.6, en la Figura 4.30 se muestra los GD acumulados por día, para visualizar una función de crecimiento para las partículas, a pesar de que CP en 2002 presentó las condiciones más óptimas, hay una divergencia en la distribución abarcando valores acumulados de GD positivos y negativos, así hay condiciones en CP tanto para el éxito en el crecimiento como para el fracaso. En MNS es más positiva la tendencia tanto en 2002 como 2005 y en MNS presenta claramente GD acumulados negativos.

	$T_0 = 14^\circ C$			$T_0 = 16^\circ C$	
	2002			2005	
	A	C1	C2	$A_s$	C
MNS	27.6	25	X	65.3	60.6
MNP	-31.8	-36	-47.5	-30.3	30.4
CP	-29.2	28	24.38	54	70.36

Tabla 4.2: GD de las partículas dentro de los remolinos, con  $T_0 = 14^\circ C$  para 2002 (A: Anticiclón; C1: Ciclón 1; C2: Ciclón 2) y  $T_0 = 16^\circ$  en 2005 ( $A_s$ : Anticiclón subsuperficial; C: Ciclón) en los experimentos MNS, MNP y CP. La X indica que no hay partículas en el remolino.

	$T_0 = 15^\circ C$				
	2002			2005	
	A	C1	C2	$A_s$	C
MNS	-12	-14.6	X	84	89
MNP	-75.5	-72	-88	-4.2	12.5
CP	-11	11	-16	80	103.7

Tabla 4.3: GD de las partículas dentro de los remolinos, con  $T_0 = 15^\circ C$  para 2002 (A: Anticiclón; C1: Ciclón 1; C2: Ciclón 2) y 2005 ( $A_s$ : Anticiclón subsuperficial; C: Ciclón) en los experimentos MNS, MNP y CP. La X indica que no hay partículas en el remolino.

	$T_0 = 13^\circ C$				
	2002			2005	
	A	C1	C2	$A_s$	C
MNS	44.2	41.4	X	137	143
MNP	-16.2	-19.5	-31.8	50	49.9
CP	44.8	44	40	134	158

Tabla 4.4: GD de las partículas dentro de los remolinos, con  $T_0 = 13^\circ C$  para 2002 (A: Anticiclón; C1: Ciclón 1; C2: Ciclón 2) y 2005 ( $A_s$ : Anticiclón subsuperficial; C: Ciclón) en los experimentos MNS, MNP y CP. La X indica que no hay partículas en el remolino.

	$T_0 = 14^\circ C$	$T_0 = 16^\circ C$
	2002	2005
MNS	31.5	51.6
MNP	-28.7	-32.8
CP	34.8	52.7

Tabla 4.5: GD de las partículas en zonas con alta agregación de partículas, con  $T_0 = 14^\circ C$  para 2002 y  $T_0 = 16^\circ C$  en 2005 en los experimentos MNS, MNP y CP.

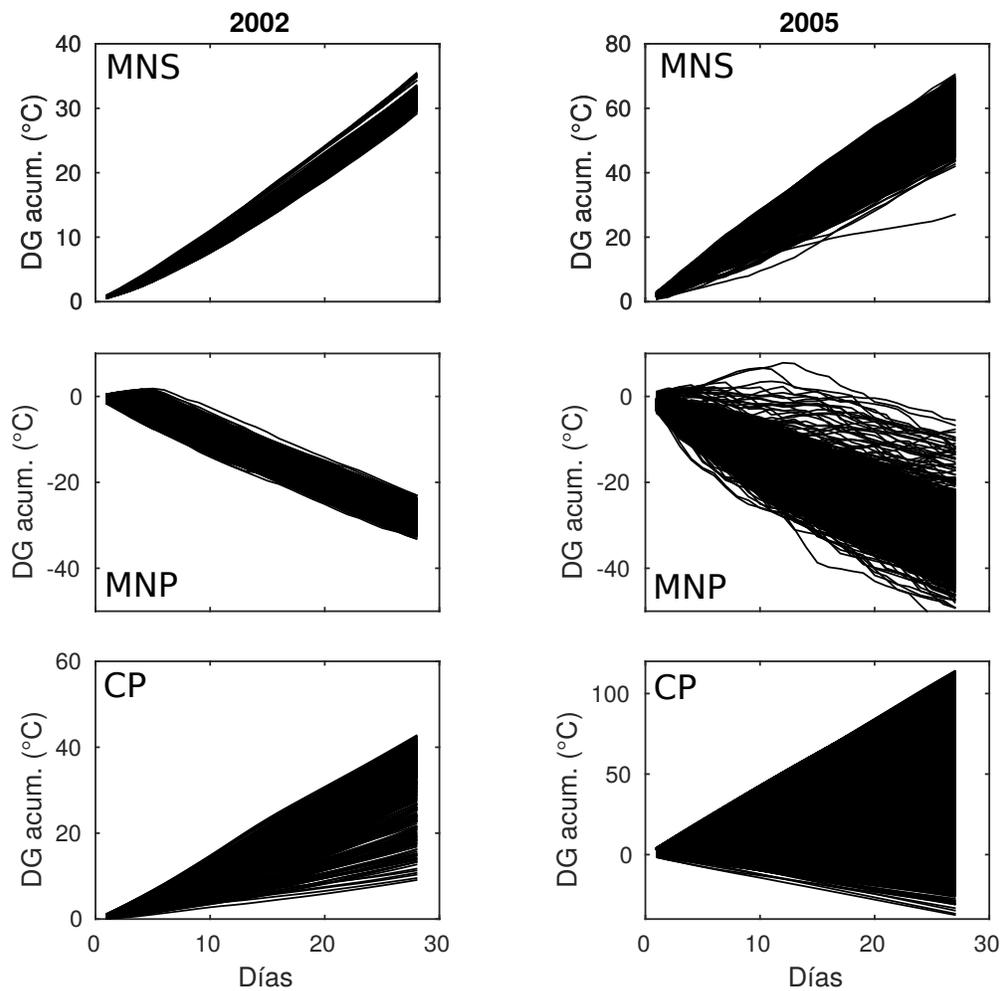


Figura 4.30: GD acumulados por día en un mes para las partículas en las zonas con mayor agregación para el caso 2002 (mes de octubre; primera columna) y 2005 (mes de enero; segunda columna) para los experimentos de migración diurna nictimeral superficial (MNS; primera fila), migración diurna nictimeral profunda (MNP; segunda fila) y comportamiento pasivo (CP; tercera fila).

---

## 5. Conclusiones

Basados en las salidas del modelo hidrodinámico ROMS (2001-2008), se estudiaron los remolinos de mesoscala superficiales en la región comprendida entre 27°S- 37°S, y 71°W-83°W (grilla padre), incluyendo la dorsal de Juan Fernández (DJF; grilla hijo). Se detectaron y caracterizaron algunas propiedades de estos remolinos a través de un método de detección automatizado híbrido, que mezcla tanto un criterio físico como uno geométrico, y con un algoritmo de seguimiento se lograron establecer las trayectorias de estos remolinos. Durante los 8 años de simulación numérica, el número de remolinos detectados en la grilla padre fue de 26762, de los cuales 12409 (46.4 %) correspondieron a remolinos anticiclónicos y 14353 (53.6 %) correspondieron a remolinos ciclónicos. En el sistema de la DJF se detectaron 1498 remolinos superficiales, siendo de 715 (47.7 %) remolinos anticiclónicos y 783 (52.3 %) remolinos ciclónicos. El patrón espacial obtenido del número de remolinos en la grilla padre, coincide cualitativamente con estudios anteriores basados en altimetría satelital (Chaigneau et al., 2009). En cuanto a la DJF, la parte oriental presentó interacción con una mayor cantidad de remolinos en comparación con el lado occidental. El año con menor cantidad de remolinos detectados en la grilla padre fue el 2003 y el año con mayor cantidad de remolinos corresponde al 2007. En la DJF, el año con menor cantidad de remolinos fue el año 2006 mientras que el año 2001 presentó la mayor cantidad. Con respecto a la variabilidad interanual espacial del número de remolinos, durante los años 2002-2003, en la zona de transición costera (ZTC) se reduce notablemente el número de remolinos. En cambio, los años 2007-2008 presentan mayor número de remolinos en la ZTC.

Los resultados de la distribución espacial del radio promedio indican que el tamaño de los remolinos decrece hacia los bordes este y hacia los polos, coincidiendo con la

teoría quasi-geostrófica. El radio de los remolinos detectados en la grilla padre y en la DJF, tanto anticiclones como ciclones, se distribuyen entre 30 a 110 km, presentando una mayor frecuencia en los  $\sim 50$  km. En la DJF no se observaron remolinos con un radio mayor a 90 km. El patrón de las trayectorias indicó una propagación sur-oeste de los remolinos ciclónicos y noroeste de los remolinos anticiclónicos, patrón acorde con la teoría y con estudios anteriores.

Por otra parte, el análisis de las salidas del modelo biofísico indicó que las estructuras de mesoscala como estelas de remolinos y estructuras de submesoscala (i.e. vórtices de Von Karman, remolinos de submesoescala) determinan la distribución de los organismos pelágicos de la DJF. Las estrategias biológicas de migración vertical superficial y profunda permiten que exista mayor agregación de partículas, además estas agregaciones están asociadas a niveles bajos de EKE. Organismos asociados a migraciones más superficiales ofrecen mejores condiciones para el crecimiento que los organismos que migran a mayores profundidades dentro y fuera de las estructuras de submesoescala (remolinos) y mesoscala (estelas), siendo los remolinos de mesoescala los que ofrecen las condiciones óptimas para el crecimiento.

En este estudio se evidenció que los remolinos de mesoscala no son las estructuras más importantes en la distribución y pero si en el crecimiento de las especies pelágicas de la DJF. Son otras las estructuras de mesoscala, como estelas y estructuras de submesoscala como remolinos y vórtices de von Kármán, las que contribuyen al transporte larval y agregación de partículas en parches. La agregación de organismos es un mecanismo ventajoso para reducir el riesgo de predación, por lo tanto, entender los mecanismos que la genera es relevante. Por otra parte, la migración vertical de las partículas promueve el acoplamiento con las estructuras de submesoscala y estelas de mesoscala, favoreciendo la agregación de partículas y el transporte larval. El crecimiento asociado a los dos tipos de migración vertical es diferente, siendo el crecimiento de MNS más exitoso que MNP. Para que el crecimiento en MNP sea exitoso, las partículas con MNP deben tener un  $T_0$  más bajo que MNS, es decir, MNP debe adaptarse al sistema de forma diferente a MNS para tener el mismo desempeño. En concreto, la interacción directa de los remolinos de mesoescala y la migración vertical en el plancton no parecen modular la distribución, pero si el crecimiento de las especies pelágicas en la Dorsal de Juan

Fernández. Sin embargo, cabe destacar que el flujo asociado a estructuras de mesoescala podría ser responsable de generar estructuras de submesoescala, las cuales si interactúan y modulan la distribución de estas especies en la Dorsal.

Una limitación del estudio es el número reducido (2) de casos en estudio. A pesar de ello, es una primera aproximación para comprender la distribución larval en la DJF. En trabajos futuros se requiere desarrollar más experimentos para entender los mecanismos responsables de la distribución y el crecimiento exitoso a lo largo del tiempo en la DJF. Este estudio sólo abordó el impacto de la estrategia biológica de la migración vertical. Una extensión de este estudio debería incluir la mayor cantidad de estrategias biológicas posibles para las especies de la DJF, como la capacidad de natación, disponibilidad de alimento, boyantez de las larvas. Para ello es necesario un mayor conocimiento de la historia de vida de las especies endémicas de la DJF, información que actualmente es muy escasa.

---

# Bibliografía

- [1] Atkinson, B. W. (1981). *Mesoscale Atmospheric Circulation*. Academia Press, Inglaterra, 495 pp.
- [2] Amante, C., & Eakins, B. (2008). 1 Arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis (ETOPO1). NOAA, National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado, USA.
- [3] Andrade, I., Hormazábal, S., & Correa-Ramírez, M. (2012). Ciclo anual de la clorofila-  $\alpha$  satelital en el Archipiélago de Juan Fernández (33° S), Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40, 657-667.
- [4] Andrade, I., Hormazábal, S., & Combes, V. (2014). Intrathermocline eddies at the Juan Fernández Archipelago, Southeastern Pacific Ocean. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(4), 888-906.
- [5] Arana, P. (2010). *La isla de Robinson Crusoe*. Ediciones Universitarias de Valparaíso, Valparaíso.
- [6] Aristegui, J., Tett, P., Hernández-Guerra, A., Basterretxea, G., Montero, M. F., Wild, K., ... & Pacheco, M. (1997). The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: a study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(1), 71-96.
- [7] Basdevant, C., & Philipovitch, T. (1994). On the validity of the “Weiss criterion” in two-dimensional turbulence. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 73(1-2), 17-30.

- [8] Beggs, P., Selkirk, P., & Kingdom, D. (2004). Identification of Von Karman Vortices in the Surface Winds of Heard Island. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(2), 287-297.
- [9] Brett, J. R. (1979). 10 Environmental Factors and Growth. *Fish Physiology*, 8, 599-675.
- [10] Chaigneau, A., & Pizarro O. (2005). Eddy characteristics in the Eastern South Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C6).
- [11] 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), 106-119.
- [12] Chelton, D., Schlax, M., Samelson, R., & de Szoeke, R. (2007). Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15).
- [13] Chelton, D., Schlax, M., & Samelson, R. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2), 167-216.
- [14] Colas, F., McWilliams, J. C., Capet, X., & Kurian, J. (2012). Heat balance and eddies in the Peru-Chile Current System. *Climate Dynamics*, 39(1-2), 509-529.
- [15] Combes, V., Hormazabal, S., & Di Lorenzo, E. (2015). Interannual variability of the subsurface eddy field in the Southeast Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(7), 4907-4924.
- [16] Correa-Ramírez, M. A., Hormazábal S., & Yuras G. (2007). Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°S-39°S). *Geophysical Research Letters*, 34(12).
- [17] Correa-Ramírez, M., & Hormazábal, S. (2012). MultiTaper Method-Singular Value Decomposition (MTM-SVD): Variabilidad espacio-frecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar en el Pacífico Suroriental. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(4), 1039-1060.

- [18] Cowen, R., Lwiza, K., Sponaugle, S., Paris, C., & Olson, D. (2000). Connectivity of marine populations: Open or closed? *Science*, 287, 857-859.
- [19] Cowen, R.K. (2002). Larval dispersal and retention and consequences for population connectivity. *Coral Reef Fishes: Dynamics and Diversity in a Complex Ecosystem*, 149.
- [20] Cushman-Roisin, B. (1994). *Introduction to Geophysical Dynamics*, 320 pp.
- [21] Debreu, L., Vouland, C., & Blayo, E. (2008). AGRIF: Adaptive grid refinement in Fortran. *Computers & Geosciences*, 34(1), 8-13.
- [22] Debreu, L., Marchesiello P., Penven P., & Cambon G. (2011). Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49-50, 1-21.
- [23] ENFEN, (2003). Informe Técnico ENFEN-Enero 2003, Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño <http://www.imarpe.gob.pe>
- [24] Ernst, B., Chamorro, J., Manríquez, P., Orensanz, J., Parma, A., Porobic, J., & Román, C. (2013). Sustainability of the Juan Fernández lobster fishery (Chile) and the perils of generic science-based prescriptions. *Global Environmental Change*, 23(6), 1381-1392.
- [26] Gordon, A., Giulivi, F., Lee, M., Furey, H., Bower, A., & Talley, L. (2002). Japan/East Sea intrathermocline eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 32(6), 1960-1974.
- [27] Gunther E. R. (1936). A report on oceanographical investigation in Peru Coastal Current. *Discovery Reports*, 13, 107-276.
- [28] Halpin, P., Strub, T., Peterson, W., & Baumgartner, T. (2004). An overview of interactions among oceanography, marine ecosystems, climatic

- and human disruptions along the eastern margins of the Pacific Ocean. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77, 371–409.
- [29] 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.
- [30] Hare, J., & Cowen, R. (1997). Size, growth, development, and survival of the planktonic larvae of *Pomatomus Saltatrix*. *Ecology*, 78, 2415–2431.
- [31] Hormazábal, S., Shaffer, G., & Leth, O. (2004). Coastal transition zone off Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C1).
- [32] Hormazábal, S., Combes, V., Morales, C., Correa-Ramírez, M., Di Lorenzo, E., & Nuñez, S. (2013). Intrathermocline eddies in the coastal transition zone off central Chile (31–41° S). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(10), 4811-4821.
- [33] Houde, E., & Zastrow, C. (1993). Ecosystem- and taxon-specific dynamic and energetics properties of larval fish assemblages. *Bulletin of Marine Science*, 53(2), 290-335.
- [34] Johnson, G., & McTaggart, K. (2010). Equatorial Pacific 13°C Water Eddies in the Eastern Subtropical South Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 40(1), 226-236.
- [35] Leth, O., & Shaffer, G. (2001). A numerical study of the seasonal variability in the circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C10), 22229-22248.
- [36] Lett, C., Verley, P., Mullon C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., & Blanke, B. (2008). A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1210-1214.

- [37] McWilliams, J. C. (2010). A perspective on submesoscale geophysical turbulence. In IUTAM Symposium on Turbulence in the Atmosphere and Oceans (pp. 131-141). Springer Netherlands.
- [38] Marchesiello, P., McWilliams, J.C., Shchepetkin, A. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 3, 1–20.
- [39] Parada, C., van der Linger C., Mullon C., & Penven P. (2003). Modelling the effect of bouyancy on the transport of anchovy (*Engraulis capensis*) eggs from spawning to nursery grounds in the southern Benguela: an IBM approach. *Fisheries Oceanography*, 12(3), 170-184.
- [40] Parada, C., Gretchina A., Vásquez S., Combes, V., Ernst B., Sepúlveda A., & DiLorenzo E. Expanding the conceptual framework of the spatial population structure and life history of jack mackerel in the southeastern Pacific off Central Chile: Oceanic seamount region as potential spawning/nursery habitat. En revisión.
- [41] Parin, N., Mironov, A., & Nesis, K. (1997). Biology of the Nazca and Sala y Gómez submarine ridges, an outpost of the Indo-West Pacific fauna in the Eastern Pacific Ocean: composition and distribution of the fauna, its communities and history. *Advances in Marine Biology*, 32, 145-242.
- [42] Penven, P., Echevin, V., Pasapera, J., Colas, F., & Tam, J. (2005). Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C10).
- [43] Pineda, J., Hare, J.A., & Sponaugle, S. (2007). Larval transport and dispersal in the coastal ocean and consequences for population connectivity. *Oceanography*, 20, 22–39.
- [44] Porobic, J., Parada, C., Ernst, B., Hormazábal, S. E., & Combes, V. (2012). Modelación de la conectividad de las subpoblaciones de la langosta

- de Juan Fernández (*Jasus frontalis*), a través de un modelo biofísico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(3), 613-632.
- [45] Rodrigo, C., & Lara, L. (2014). Plate tectonics and the origin of the Juan Fernandez Ridge: analysis of bathymetry and magnetic patterns. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(4), 907-917.
- [46] Samuelsen, A., Hjøllø, S., Johannessen, A., & Patel, R. (2012). Particle aggregation at the edges of anticyclonic eddies and implications for distribution of biomass. *Ocean Science*, 8(3), 389-400.
- [47] Sangrà, P., Auladell M., Marrero-Díaz A., Pelegrí J.L., Fraile-Nuez E., Rodríguez-Santana A., Martín J.M., Mason E., & Hernández-Guerra A. (2007). On the nature of oceanic eddies shed by the Island of Gran Canaria. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54(5), 687-709.
- [48] Shchepetkin, A., & McWilliams, J. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4), 347-404.
- [49] Silva, N., & Neshyba S. (1979). On the southernmost extension of the Peru-Chile undercurrent. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 26(12), 1387-1393.
- [50] Silva, N., Rojas N., & Fedele A. (2009). Water masses in the Humboldt current system: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial subsurface water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 1004-1020.
- [51] Souza, J. M. A. C. D., De Boyer Montegut, C., & Le Traon, P. Y. (2011). Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean. *Ocean Science*, 7(3), 317-334.

- [52] Weiss, J. (1991). The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 48(2-3), 273-294.
- [53] Werner F., Cowen R., & Paris C. (2007). Coupled biological and physical models: present capabilities and necessary developments for future studies of population connectivity. *Oceanography*, 20, 54-69