



PEDECIBA – Geociencias
Facultad de Ciencias, UdelaR
Tesis de Maestría

**ANÁLISIS DEL ROL DEL FRENTE
SUBTROPICAL DE PLATAFORMA SOBRE
HUEVOS Y LARVAS DE *Engraulis anchoita*
UTILIZÁNDO UN ENFOQUE BIO-FÍSICO**

Lic. JAVIER RABELLINO FLORES

Orientador: Dr. Marcelo Barreiro
Co-orientador: Dr. Danilo Calliari

Montevideo, Uruguay
Junio 2016

Tesis presentada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magister en Geociencias.

Juzgada el día/...../..... por

.....
Dr. **Calificación**

.....
Dr. **Calificación**

.....
Dr. **Calificación**

AGRADECIMIENTOS

A Marcelo Barreiro y Danilo Calliari por orientarme a lo largo de la maestría, por sus consejos, comentarios, brindarme todo lo necesario para la realización de la tesis y principalmente por la enorme paciencia.

A mi familia, mis padres, hermanos y Sole por ser un apoyo constante e incondicional en todo momento.

Al Departamento de Ciencias de la Atmósfera (Romina, Fernando, Santiago, Stefanie, Matilde, Juan, Gastón, Natalia, Verónica, Claudio y Madeleine) por toda la ayuda, comentarios y buena onda que me brindaron desde el primer día que llegue.

Al Instituto de Física de Facultad de Ciencias por brindarme un lugar para desarrollar mi trabajo y tratarme como uno más.

Al programa de posgrado PEDECIBA-Geociencias y principalmente a Alalía Fein por estar siempre disponible para ayudarnos a los estudiantes.

A Angel Segura por ayudarme a comenzar esta maestría.

A Alberto Piola y el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) por la ayuda financiera.

A los correctores de la tesis por los valiosos comentarios que mejoraron significativamente el manuscrito original.

A los mismos de siempre...

CONTENIDO

Resumen	vii
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1 La anchoita y el Atlántico Sudoccidental	10
1.2 Ictiopláncton	13
1.3 Reclutamiento	15
1.4 Abordaje del Problema	18
1.5 Hipótesis y objetivos	20
1.5.1 Hipótesis	21
1.5.2 Objetivo	22
1.5.3 Objetivos específicos	22
2. CAPÍTULO II: SIMULACIÓN CLIMATOLÓGICA DEL ATLÁNTICO SUDOCCIDENTAL Y EL FRENTE SUBTROPICAL DE PLATAFORMA	23
2.1 Introducción	23
2.1.1 El Atlántico Sudoccidental y el Frente Subtropical de Plataforma	23
2.1.2 El modelo numérico: Regional Ocean Model System (ROMS)	29
2.2 Métodos	31
2.2.1 Configuración del ROMS	31
2.2.1.1 Grilla	31
2.2.1.2 Condición de borde y forzantes	32
2.2.1.3 Condiciones iniciales	34
2.2.2 Validación del ROMS	35
2.2.2.1 Análisis comparativo entre las salidas de ROMS y una climatología del Río de la Plata y su Frente Marítimo (Guerrero et. al., 2010)	36
2.3 Resultados y Discusión	39

2.3.1	Altura del nivel del mar (SSH)	39
2.3.2	Velocidad superficial (u, v) grilla padre	41
2.3.3	Velocidad superficial (u, v) grilla hija	43
2.3.4	Módulo de la velocidades	44
2.3.5	Transportes de volumen	46
2.3.6	Análisis estacional en la grilla hija	49
2.3.6.1	Salinidad superficial	49
2.3.6.2	Temperatura superficial	52
2.3.7	Resultado del análisis comparativo entre las salidas de ROMS y una climatología del Río de la Plata y su Frente Marítimo (Guerrero et. al., 2010)	55
2.3.7.1	Temperatura período frío 0 m	55
2.3.7.2	Temperatura período cálido 0 m	56
2.3.7.3	Salinidad período frío 0 m	57
2.3.7.4	Salinidad período cálido 0 m	59
2.3.7.5	Temperatura período frío 50 m	60
2.3.7.6	Temperatura período cálido 50 m	61
2.3.7.7	Salinidad período frío 50 m	62
2.3.7.8	Salinidad período cálido 50 m	63
2.3.8	Caracterización del STSF	63
2.4	Conclusión	71
3.	CAPÍTULO III: EL ROL DEL STSF COMO POSIBLE BARRERA PARA HUEVOS Y LARVAS DE LA ANCHOITA	74
3.1	Introducción	74
3.1.1	Caso de estudio: la anchoita (<i>Engraulis anchoita</i>) en el ASO	74
3.1.2	Desove (zonas y período del año)	75
3.1.3	Zonas de cría y distribución de larvas según la región	79
3.2	Métodos	81
3.2.1	El Ichthyop	81

3.2.2 Configuración	82
3.2.2.1 Dominio espacial	82
3.2.2.2 Período, duración temporal y crecimiento	83
3.2.3 El STSF y elección de Zonas de Liberación (ZIs)	86
3.2.3.1 El STSF: definición operacional	86
3.2.3.2 Zonas de Liberación (ZIs)	89
3.2.4 Reclutamiento: criterio	93
3.2.5 Sensibilidad del número de individuos	94
3.3 Resultados y discusión	94
3.3.1 Cruce de partículas a través del frente (casos I y II)	94
3.3.2 Cruces y la Región Frontal (RF)	97
3.3.3 Reclutamiento	107
3.3.4 Análisis de sensibilidad del número de individuos	113
3.4 Conclusión	114
4. CAPÍTULO IV: CONSIDERACIONES FINALES	117
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

RESUMEN

El trabajo estudia la influencia del Frente Subtropical de Plataforma (STSF) sobre la dispersión de huevos y larvas de *Engraulis anchoita* en un desove invernal. En un primer paso se configuró en forma anidada el Regional Ocean Model System (ROMS) en el Atlántico sudoccidental para simular adecuadamente el STSF. Las salidas de este modelo fueron luego usadas como entrada para un Modelo Basado en Individuos (MBI). La resolución de ROMS en la zona del STSF fue $1/12^\circ$. En este primer acercamiento no se incluyeron en forma explícita fuentes puntuales de ríos ni mareas. Se realizó una corrida de 8 años como spin-up y a partir de esta se realizó otra de 8 años para validar el modelo. El modelo reprodujo de forma realista las principales características de la circulación del Atlántico Sudoccidental y del STSF, mejor representado en invierno, por lo que se realizó el acople con el MBI durante esta estación. Las simulaciones del MBI tuvieron una duración de 19 días cada una, suficiente para que los individuos alcancen una talla suficiente para adquirir capacidad de nado. Se consideraron tres inviernos dividiéndolos en tres períodos de 19 días (julio, julio y agosto), completando un total de 9 experimentos. Definimos el STSF como el gradiente de temperatura promedio entre 20 y 200 m de profundidad y se ubicó una zona de liberación a cada lado del mismo, sumándose una zona frente al Río de la Plata. Evaluamos si los individuos liberados a uno u otro lado del STSF cruzan el mismo al final de la simulación. Se evaluó la intensidad del frente, la ubicación de las zonas de liberación, el período del año y las corrientes. Se estableció un criterio de reclutamiento y se evaluó éste en función de la zona de liberación, el año y el período. Los cruces resultaron bajos, pero mayores de W a E. La intensidad del frente no parece ser un factor relevante en el destino de los individuos, sino que parece estar regulado por la magnitud y dirección de las corrientes medias sobre la

plataforma, así como de su variabilidad a escala diaria.

Palabras clave: Modelación numérica, *Engraulis anchoita*, ictiopláncton, reclutamiento

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 La anchoita y el Atlántico Sudoccidental

En el Océano Atlántico Sudoccidental (ASO) pueden encontrarse un gran número de especies de peces en la plataforma continental, que cumplen todo o parte de su ciclo de vida allí. Una de las especies más abundantes es *Engraulis anchoita* Hubbs & Marini, 1935 (anchoita), cuyos huevos y larvas pueden ser de los más frecuentes y abundantes en las muestras de ictioplancton (Hansen, 2004). La especie constituye un importante eslabón en la cadena trófica y juega un rol clave en el ecosistema pelágico de plataforma, debido a que se alimenta principalmente de las fracciones más pequeñas del plancton y su abundancia y valor nutricional convierte la especie en un ítem alimenticio muy frecuente para muchos otros taxas que habitan la región (Sánchez, 1990; Bakun & Parrish, 1991). La anchoita forma parte de un grupo de especies pelágicas que proporciona grandes volúmenes de producción pesquera en diferentes regiones del mundo, como son aquellas de la familia *Engraulidae*. Estas comprenden un recurso extremadamente importante en la producción pesquera mundial y están generalmente asociadas a zonas altamente productivas de los océanos (Whitehead et al., 1988).

La distribución espacial de la anchoita se extiende a lo largo de la costa Atlántica de Sudamérica desde el sur de Brasil (~22°S) hasta el norte patagónico en Argentina (~47°S) y desde profundidades someras (incluso dentro del Río de la Plata, Vera, 2011) hasta el quiebre del talud continental, aunque se han registrado adultos en el océano profundo lejos de la plataforma (Whitehead et al., 1988; Hansen, 2004) (Figura 1).

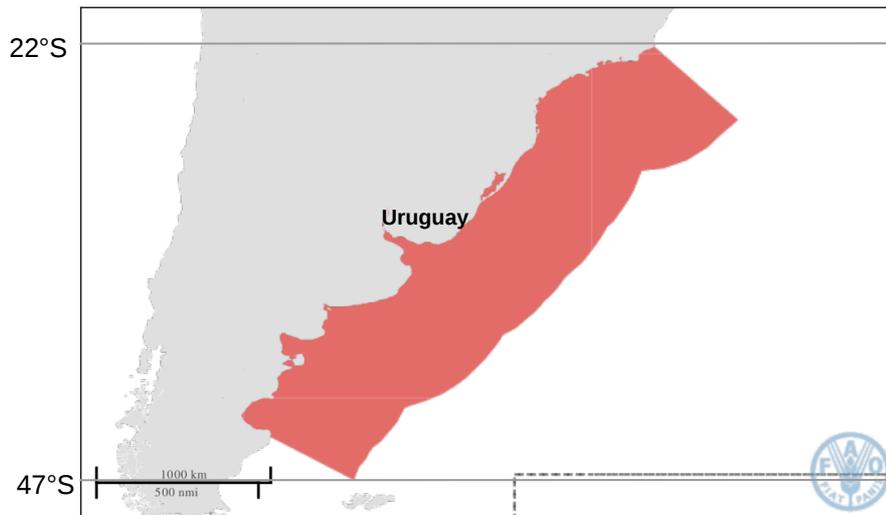


Figura 1: zonas de distribución de *Engraulis anchoita*. Figura modificada de FAO Species catalogue Vol. 7.

Es una especie que se caracteriza por ser un desovante múltiple que se reproduce durante todo el año pero con distinta intensidad y ubicación geográfica según la época del año (Sánchez, 1990). Sus sitios de desove varían dentro del período reproductivo entre las plataformas continentales de Argentina, Uruguay y Brasil (Alheit et al., 1991). Sus huevos y larvas se distribuyen principalmente sobre la plataforma continental, coincidiendo dentro de la región con la población adulta en al menos alguna parte del año (Bakun & Parrish, 1991; Hansen, 2004).

El Atlántico Sudoccidental tiene como su característica principal a la confluencia de Brasil-Malvinas (CBM). La misma representa una de las regiones más energéticas de los océanos y es consecuencia del encuentro de dos grandes corrientes en $\sim 38^{\circ}\text{S}$ (Gordon, 1989; Chelton et al., 1980). La Corriente de Brasil fluye en dirección sur transportando principalmente masas de agua cálidas y de salinidad relativamente alta, mientras que la Corriente de Malvinas fluye en sentido opuesto transportando principalmente aguas subantárticas más frías y menos

salada (Gordon et al., 1999). Es así que en el ASO pueden encontrarse un número de masas de agua de diversos orígenes (Piola et al., 2000; Ortega & Martínez, 2007) que generan diversidad de frentes y procesos oceanográficos de alta energía. La plataforma continental en el ASO se ensancha progresivamente desde Cabo Frío (Brasil, $\sim 22^{\circ}\text{S}$), donde alcanza ~ 70 km desde la costa, pasando por la plataforma uruguaya hasta alcanzar su extremo sur en la plataforma Argentina ($\sim 51^{\circ}\text{S}$, ~ 860 km). Sobre la plataforma, la circulación depende en gran forma de las condiciones de variación espacial y temporal de la CBM, además de forzantes locales (e.g. viento, mareas, flujos de calor) (Palma et al., 2008). La CBM presenta un patrón estacional de migración, pudiendo variar entre 30° - 35°S en invierno (Ciotti et al., 1995) y entre 40° - 46°S en verano. A su vez la plataforma del ASO contiene la descarga del Río de la Plata (RdIP, ca. 35°S), que fuerza la región con un flujo promedio anual de $\sim 22000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Guerrero et al., 1997). Se observa entonces que en una zona de grandes variaciones en las condiciones oceanográficas la anchoita tolera rangos amplios de temperatura (8° - 23°C) y salinidad (14-35) (Ciechomski, 1967; Hansen, 2004).

A pesar de la gran variedad de procesos oceanográficos que ocurren a distintas escalas en la región, se reconocen estructuras oceanográficas relativamente constantes en el tiempo y en el espacio, como el Frente Subtropical de Plataforma (STSF, *sensu* Piola et al., 2000). El STSF es una estructura descrita como permanente sobre la plataforma (Piola et al., 2000; Piola et al., 2008). El frente tiene su origen en el encuentro de dos masas de agua de plataforma con dirección de flujo contrarias: el Agua Subtropical de Plataforma (ASTP) más cálida, salina y fluyendo en dirección sur, y el Agua Subantártica de Plataforma (ASAP) más fría y menos salina que fluye hacia el norte (Piola et al., 2000). El frente resultante muestra una orientación aproximada N-S sobre la plataforma.

Una característica muy importante del frente es que se encuentra compensado en densidad. Pese a existir diferencias en temperatura y salinidad ente las masas de agua que lo componen las mismas tienden a compensar su densidad por lo que el frente no es evidente si miráramos únicamente a esta variable. En la descripción del STSF Piola et al. (2000) notan que no hay registros de ASAP ni de ASTP al norte y sur del frente respectivamente.

1.2 Ictiopláncton

El ciclo de vida de los peces puede dividirse en etapas de acuerdo a su estadio de desarrollo: embrionario o de huevo, larval, juvenil, adulto y senescente (Fuiman, 2002) (Figura 2). Los estadios tempranos -embrionario y larval- son el principal mecanismo de dispersión y flujo génico y el éxito de estos estadios son muy relevantes para definir el tamaño de la población adulta (Ehrlich, 2010). Durante la etapa de huevo los individuos no poseen capacidad locomotora, mientras que durante el inicio y parte de la etapa larval la capacidad motora es inexistente o muy escasa, ya sea a través del nado vertical o con algún sistema de control de la flotabilidad. La etapa larval puede a su vez subdividirse en tres subestadios -preflexión, flexión y postflexión- de acuerdo al grado de flexión que presenta la sección terminal de la notocorda durante la formación de la aleta caudal, muy importante en la propulsión del nado (Ehrlich, 2010). Sin embargo no es la única aleta que progresivamente se desarrolla, lo que marca un incremento progresivo en la capacidad de nado a medida que avanza el desarrollo de las larvas de preflexión a la postflexión. Esta reducida capacidad de nado hace que los mismos sean muy dependientes de las condiciones ambientales y es ésta última cualidad la que origina que a los estadios tempranos se les denomine

ictioplancton, cuyo significado viene de dos palabras griegas: ictio del griego ichtýs = pez, y plancton del griego plagktós = errantes.

Los estadios de huevo y larva de los peces teleósteos suelen estar sujetos a grandes tasas de mortalidad, por lo que el sustento de las poblaciones requiere de una muy alta fecundidad como mecanismo compensativo, observándose en muchas poblaciones que el número anual de huevos desovados por una población supera 1×10^{12} (Houde, 2002). La mortalidad en los peces es edad-específica o estadio-específica, siendo las etapas que conforman el ictioplancton donde suele ocurrir la mayor mortalidad natural y que puede superar el ~95% (Moyle & Cech, 2004). La mortalidad en etapas tempranas suele ser multicausal: predación, desnutrición, enfermedades, condiciones ambientales desfavorables y actividades humanas (pesquerías, contaminación), transporte a sitios desfavorables (o advección, Houde, 2002).

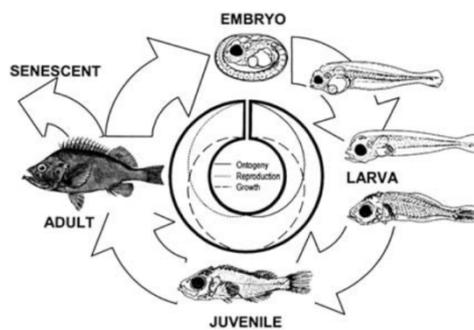


Figura 2: Ciclo de vida de los peces generalizado. Se muestran los períodos principales y los procesos intrínsecos asociados. El esquema circular del medio muestra los cambios ontogenéticos (línea continua) comenzando al inicio de la fertilización del huevo, disminuyendo hacia la etapa larval. El crecimiento (línea punteada) también comienza con la fertilización y disminuye hacia la adultez. La reproducción (línea con puntos) comienza con la diferenciación gonadal y disminuye hacia la senescencia (Figura tomada de Fuiman & Werner (2002)).

1.3 Reclutamiento

Históricamente se ha observado que muchas poblaciones de peces experimentan grandes variaciones interanuales en el tamaño de sus poblaciones, y el comprender los mecanismos que explican este fenómeno es un tema central de la oceanografía biológica (Houde, 2008). Según Bakun (1996) el reclutamiento (visto desde un punto de vista pesquero) es la cantidad de peces “jóvenes” que sobreviven a las etapas de huevo, larva y juvenil que pueden ser capturadas por las pesquerías. Sin embargo en este trabajo lo abordaremos desde un punto de vista ecológico: la incorporación de nuevos individuos juveniles al resto de la población adulta; la diferencia radica en el hecho de que no importa si alcanzan la talla/edad de entrar a la pesquería o no. El reclutamiento por tanto es función de un gran número de procesos biológicos (i.e. fecundidad y condición de las hembras, la característica y morfología de los huevos, la nutrición de las larvas, la metamorfosis) y físicos (transporte por parte de las corrientes, zonas de resuspensión de nutrientes, retención) que involucran varias etapas en la vida de un pez (Moyle & Cech, 2004; Houde, 2008).

La gran mayoría de los peces marinos producen huevos pelágicos que flotan en la columna de agua a merced de las corrientes oceánicas (Fuiman, 2002). Para mantener poblaciones estables en tiempo, es decir para asegurar el reclutamiento, es crítico que huevos y larvas se mantengan (o retornen) dentro del ámbito geográfico de la población parental, para poder reincorporarse a la misma y cerrar el ciclo de vida (Fuiman, 2002).

Diversas teorías se han desarrollado con el fin de explicar las variaciones interanuales en el reclutamiento, y es de ésta forma que se evidencia la

relevancia de los procesos físicos oceanográficos para comprender la variabilidad biológica en las poblaciones de peces. El noruego Johan Hjort (1914), buscando explicaciones sobre la variabilidad registrada en los stocks del arenque del Atlántico (*Clupea harengus*, Linnaeus, 1758), observó que la suerte de una clase anual (cohorte) está principalmente determinada por la mortandad en las etapas tempranas del ciclo de vida. Hjort estableció dos hipótesis centrales para explicar la variabilidad en el reclutamiento. Primero sugirió que la variabilidad en magnitud de las clases anuales está determinada en las etapas tempranas en la vida de los peces, y es resultado de la variación en la disponibilidad de alimento en una etapa clave en el desarrollo larval en los peces. La misma es conocida como la hipótesis del “Período Crítico”, el cual hace referencia al momento en el cual la larva hace la transición desde una alimentación endógena donde consume únicamente el vitelo a una alimentación exógena de presas planctónicas (debe conseguir el alimento disponible en el ambiente). La larva es muy vulnerable en esa etapa y, si en dicho período de transición no encuentran alimento suficiente, la inanición resultará en mortalidad masiva y la correspondiente clase anual estará muy disminuida. Segundo, destacó la influencia del transporte de huevos y larvas lejos de las áreas de cría apropiadas, debido a diferencias interanuales en la circulación oceánica. A partir del trabajo de Hjort se ha tratado de entender las fluctuaciones en los stocks pesqueros a causa de las variaciones en el reclutamiento y en consecuencia se han desarrollado distintas hipótesis acerca de cuáles son los factores principales que permiten la supervivencia de los peces (Houde, 2008). Cushing (1969) acopló las dos hipótesis de Hjort en una única (match/mismatch hypothesis ó Ajuste/Desajuste) que sugiere que los peces desovan en períodos específicos relacionados a las floraciones estacionales del fitoplancton en primavera y otoño en latitudes templadas (e.g. Atlántico Norte), y donde ocurre una deriva larval desde zonas de desove a las

zonas de cría. Según esta hipótesis el momento del desove está acompañado (coordinado o ajustado) con la floración planctónica que proporcionará alimento a las larvas venideras. En años cuando exista un buen ajuste se producirá una clase anual abundante (reclutamiento exitoso), mientras que un desajuste llevaría a una mortandad masiva (reclutamiento reducido). Posteriormente, Reuben Lasker (1975, 1978) extendió la hipótesis de Hjort sugiriendo que hay momentos y lugares en el océano donde el alimento se acumula y que la supervivencia de las larvas es dependiente de los mecanismos que regulan la formación y desintegración de dichas acumulaciones. Observó que las concentraciones máximas de alimento para las larvas estaban muy asociadas con los máximos de clorofila en columnas de agua estratificadas, formadas en un océano calmo y estable. Así, hipotetiza que una mortandad masiva podría ocurrir en años cuando la turbulencia inducida por el viento impida la ocurrencia de períodos calmos.

Otra característica del ciclo de vida muy difundida entre los peces marinos es la ocupación de diferentes ámbitos geográficos a lo largo de la ontogenia, de manera que la transición entre diferentes estadios frecuentemente implica una migración entre ambientes espacialmente separados. Por ejemplo, áreas de desove (adultos desovantes, embriones y larvas iniciales), áreas de cría (larvas tardías y juveniles pequeños), áreas de alimentación (juveniles tardíos y adultos). Dada la nula o escasa capacidad natatoria del ictioplancton, para completar el circuito migratorio la circulación media debe favorecer el cierre del circuito (Cowan & Shaw, 2002). Evolutivamente los peces han seleccionado áreas de desove donde las corrientes medias transporten los huevos y larvas hacia zonas con las condiciones apropiadas y alimento suficiente, incluso durante el transporte (Cowan & Shaw, 2002). La eficiencia del transporte hacia las zonas de cría puede tener entonces un gran efecto en el éxito del

reclutamiento. Si los huevos o larvas son transportadas lejos del área de cría, a un sitio desde el cual los juveniles no puedan reunirse con el resto de la población serán individuos perdidos (o errantes), ya que desde el punto de vista de la población original no aportarán a la próxima generación (es decir, no podrán reproducirse). Ésta es la idea que contextualiza la hipótesis del Miembro/Errante (member/vagrant en inglés) (Iles & Sinclair, 1982). La misma establece que a lo largo de los años los peces tienden a desovar en lugares y momentos específicos dentro de estructuras predecibles de circulación. Este proceso de selección del área de desove aumenta la retención o tiempo de residencia de sus miembros dentro de estas estructuras limitando la dispersión de los mismos hasta que sean capaces de controlar su propia distribución. Los individuos transportados lejos o hacia zonas desfavorables serían los errantes y se perderán de la población. Es decir que la abundancia absoluta del stock será en gran medida independiente de la reproducción, crecimiento u otro parámetro biológico usualmente asociado y que es determinada principalmente por la interacción de características comportamentales y la estructura física del ambiente. Estos factores comportamentales incluyen la selección del sitio de desove por el grupo desovante y el movimiento de las larvas para hacer efectiva la retención (Iles & Sinclair, 1982).

1.4 Abordaje del problema

El éxito de la estrategia reproductiva de los peces es entonces una combinación de procesos físicos y biológicos que pueden resumirse en dos características generales, el comportamiento animal tanto de los adultos en la selección del lugar y momento del desove, como de las larvas (principalmente la migración vertical) y los procesos hidrodinámicos (Bakun, 1996). Los procesos hidrodinámicos favorecen la retención de

huevos, larvas y alimento en ciertas regiones, o proporcionan condiciones para que se produzca un bloom planctónico que contribuyen a que la estrategia reproductiva de los peces sea exitosa y se pueda así mantener la población, mientras que la migración vertical permite principalmente a las larvas mantenerse en la zona donde se encuentran las mejores condiciones para su supervivencia (Bakun, 1996). Entonces el ambiente juega un rol fundamental en el ciclo de vida y será un factor determinante en el número y condición de los individuos que puedan sobrevivir y llegar a formar parte de la poblacional adulta (o stock). Esto se cumple en particular para las etapas de huevo y larva en preflexión, cuando se encuentran a merced del ambiente. El modelado de las interacciones físico-biológicas en las etapas tempranas del ciclo de vida de los peces se ha transformado en una herramienta integral para poder entender los procesos que afectan la variabilidad interanual en el reclutamiento de los peces y el grado de conectividad entre subpoblaciones (Gallego et al., 2007).

En los últimos años el avance de la informática y el impulso por el desarrollo de la tecnología en general ha dado lugar al desarrollo de herramientas oceanográficas muy potentes y precisas que han permitido un gran avance en pos de comprender la relación entre los procesos físicos oceánicos y su efecto en la variabilidad biológica. Por ejemplo, como complemento a estudios observacionales con mediciones in-situ de variables físicas y biológicas simultáneas, se han realizado análisis a través de imágenes satelitales y datos grillados globales. Asimismo se ha relacionado datos biológicos con reanálisis (o asimilaciones de datos) oceánicos (que combinan datos con salidas de modelos globales) y usado modelos numéricos hidrodinámicos para aislar procesos observados (Werner & Quinlan, 2002). Lo importante es que todas las formas mencionadas dan un punto de vista particular del problema a resolver a la

vez que son complementarias entre sí. En nuestro caso utilizaremos modelación numérica hidrodinámica, la cual ha sido muy útil en el abordaje de la interacción biofísica en el océano.

La existencia de bases de datos oceanográficas y meteorológicas globales y regionales cada vez más precisas, de mayor resolución espacial, temporal y con una escala adecuada, ha posibilitado una mejora en los forzantes, condiciones de borde e iniciales, en la validación de los modelos numéricos hidrodinámicos y por tanto en las soluciones de los mismos. A su vez, el poder computacional y la capacidad de almacenamiento han contribuido en gran forma al desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos. Los modelos numéricos hidrodinámicos (de ahora en más nos referiremos a estos solo como modelos) son cada vez más utilizados en la oceanografía para abordar todo tipo de proceso físico, químico, biológico, geológico e incluso las posibles formas en que estos interactúan. Cuando se quieren abordar temas de interacción físico-biológica, los modelos acoplados permiten su abordaje de una forma controlada y adecuada. Así, los modelos hidrodinámicos han permitido responder preguntas que de otra forma implicarían un gasto económico y logístico enorme.

1.5 Hipótesis y objetivo

Desde la localización y descripción del STSF se vienen realizando esfuerzos para conocer los procesos físicos y biológicos que forman e interaccionan con el frente (Franco et al., 2006 Piola et al., 2008; Muelbert et al., 2008; Alemany et al., 2009; Matano et al., 2010). En particular se reconoce la necesidad de continuar con el estudio de la zona para poder comprender de forma más completa la importancia biológica

del frente (Muelbert et.al., 2008). La plataforma en los alrededores de STSF sirve como un área de reproducción para varias especies de peces incluyendo algunas de alto valor económico como es la merluza (*Merluccius hubssi*) y potencialmente la anchoita (*Engraulis anchoita*), ambas bien representadas en las muestras de ictioplancton de la zona (Muelbert et. al., 2008). A lo largo de la introducción hemos visto que los procesos hidrodinámicos pueden favorecer la retención o prevenir la deriva larval siendo entonces muy importantes para el reclutamiento de la población de peces (Iles & Sinclair, 1982). Sin embargo en la zona de estudio las áreas de cría, así como los mecanismos específicos que regulan la advección (retención vs exportación) de las etapas tempranas en la vida de los peces son poco conocidas. Durante el invierno la región de ocurrencia del STSF coincide con la zona de desove de la especie objetivo. Es conocida la existencia de poblaciones de anchoita al norte y sur de este frente, sin embargo poco se conoce acerca de la influencia del mismo en el destino de los huevos y larvas de anchoita.

1.5.1 Hipótesis

La hipótesis de trabajo plantea que durante el desove invernal de *Engraulis anchoita* en los alrededores del STSF, el mismo es una barrera para los huevos y larvas que son desovados y/o eclosionan a uno y otro lado del mismo.

1.5.2 Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo principal determinar la influencia del frente sobre la dispersión de huevos y larvas de anchoita sobre la

plataforma continental a través de la implementación de una configuración adecuada de un modelo regional oceánico (Regional Ocean Model System, ROMS) para la simulación del Frente Subtropical de Plataforma y el acople de los resultados del mismo a un Modelo Basado en Individuos.

1.5.3 Objetivos específicos

- Implementar una configuración hidrodinámica climatológica para la zona de estudio capaz de representar la variabilidad estacional de la región o zona de estudio y del STSF utilizando el modelo ROMS.
- Cuantificar el transporte de huevos y larvas a través del STSF durante el invierno utilizando un Modelo Basado en Individuos (MBI).

La tesis está estructurada en capítulos. En el capítulo I trató la introducción general al trabajo, hipótesis y objetivos. El capítulo II tratará la circulación sobre la plataforma continental del ASO, se establecerá una configuración adecuada para implementar el modelo ROMS a la región, se validarán los resultados del mismo y su habilidad en representar el STSF para poder utilizarlo en el análisis de la dispersión de partículas utilizando un Modelo Basado en el Individuo. En el capítulo III se utilizarán los archivos de salida validados de ROMS para acoplarlos a un Modelo Basado en Individuos (Ichthyop), que será a su vez configurado para estudiar el transporte de huevos y larvas de anchoita en las inmediaciones del STSF. Por último un capítulo IV final con las consideraciones finales.

CAPÍTULO II: SIMULACIÓN CLIMATOLÓGICA DEL ATLÁNTICO SUDOCCIDENTAL Y EL FRENTE SUBTROPICAL DE PLATAFORMA

2.1 Introducción

2.1.1 El Atlántico Sudoccidental (ASO) y el Frente Subtropical de Plataforma (STSF)

El ASO se caracteriza por presentar una plataforma continental relativamente amplia, la cual se ensancha progresivamente desde Cabo Frío (Brasil, ~22°S) hasta su extremo sur en la plataforma Argentina (~51°S). Sobre la misma están presentes masas de agua de diversos orígenes (Gordon et al., 1999; Piola et al., 2000; Ortega & Martínez, 2007). La CBM es la característica oceanográfica que más se destaca en la región ya que resulta en una de las zonas con mayor energía en los océanos y muestra patrones de variabilidad a todas las escalas, siendo la principal el ciclo anual (Thomczak & Godfrey, 1994; Guerrero et al., 1997). Se ha establecido como ubicación media aproximada de la CBM los ~38°S (Gordon, 1989). En la atmósfera, el anticiclón del Atlántico Sur influye en la variación estacional de la dinámica y posición de la confluencia, estableciendo un patrón de migración norte-sur estacional (Thomczak & Godfrey, 1994; Guerrero et al., 1997). Por otro lado los eventos ENOS (El Niño Oscilación Sur) parecen ser la principal causa de la variabilidad interanual (Lentini et al., 2001; Ortega & Martínez, 2007). La migración de la CBM modifica las características termohalinas de las masas de agua sobre la plataforma con una predominancia de Agua Subantártica (ASA) durante invierno-primavera y un predominio de Agua Tropical (AT) y Agua Subtropical (AST) durante verano-otoño (García, 1998; Castro et al., 2006; Ortega & Martínez, 2007). La Corriente de Brasil (CB) circula en dirección sur a lo largo del quiebre de plataforma

transportando AT (temperatura (T) $>20^{\circ}\text{C}$, salinidad (S) >35 , Emilson, 1961; Piola & Matano, 2001; Palma et al., 2008). El AT es un agua superficial ($<200\text{m}$) formada a causa de la intensa irradiación y exceso de evaporación en latitudes bajas. Por debajo hay una fuerte termoclina y haloclina que refiere al Agua Central del Atlántico Sur (ACAS, $6^{\circ}\text{C}>\text{T}<20^{\circ}\text{C}$, $34,6>\text{S}<36$) o Agua Subtropical AST (Emilson, 1961; Thomsen, 1962). La Corriente de Malvinas (CM) se origina como una rama de la Corriente Circumpolar Antártica y fluye hacia el norte a lo largo de la plataforma Argentina hasta alcanzar la CB (Garzoli, 1993). Se considera a su vez que su flujo tiene un fuerte componente barotrópico (Peterson & Stramma, 1991).

La circulación superficial en el ASO (Figura 3) está relacionada con el Giro Subtropical Sur, ya que la corriente de Brasil es la corriente de contorno oeste del giro, y por tanto variaciones en la dinámica del giro tendrán su consecuencia en el ASO. La influencia atmosférica del anticiclón del Atlántico en el Giro Subtropical Sur influye a su vez en la variación estacional de la dinámica y circulación del ASO, en la posición de la confluencia y dinámica del RdIP cambiando principalmente la dirección dominante del viento (Guerrero et al., 1997). Los patrones de vientos observados en la región, se caracterizan por mostrar una gran variabilidad estacional, siendo predominantemente del sector S-SE durante el invierno y del sector N-NE durante el verano (Strubb et al., 2015). Por otro lado los eventos ENOS tienen fuerte influencia en la región sobre todo en los patrones de vientos y en la precipitación (Barreiro, 2009), lo que lleva a que también haya una importante variabilidad interanual tanto en temperatura como en la salinidad superficial (Lentini et al., 2001).

A su vez la plataforma del ASO contiene la descarga del Río de la Plata (RdIP), un estuario de 30362 km² de superficie y un ancho de boca en la desembocadura de 230 km que fuerza la región con un flujo promedio anual de ~22000 m³.s⁻¹ (CARP 2015, Guerrero et al 1997). Dicho caudal de descarga depende principalmente de los caudales de los ríos Paraná y Uruguay. Debe destacarse que aunque la magnitud del caudal de descarga no represente grandes variaciones estacionales, puede ocurrir que durante estaciones o meses muy lluviosos o muy secos la descarga alcance valores cercanos a los ~42.000 m³.s⁻¹ (con picos >60.000 m³.s⁻¹) o <12.000 m³.s⁻¹, respectivamente, generando una variabilidad interanual muy importante (Piola et al., 2005; Guerrero et al., 2010 Matano et al., 2014).

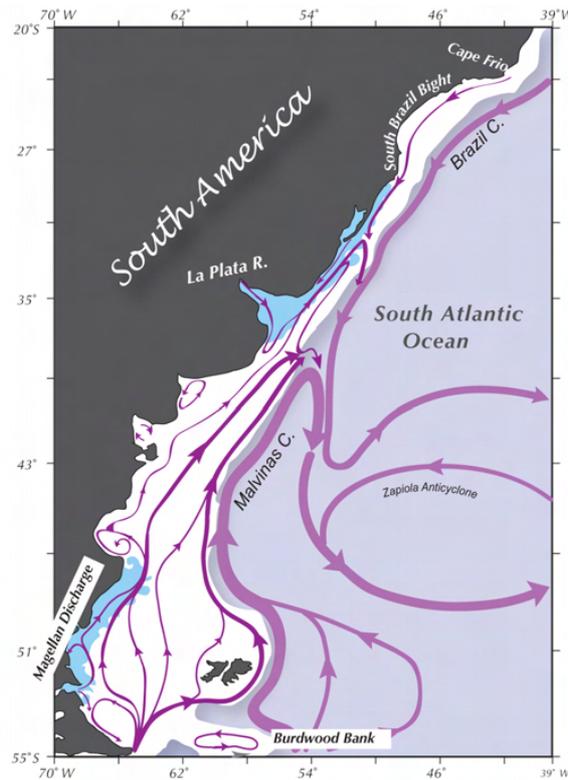


Figura 3: Esquema de circulación media del Océano Atlántico Sudoccidental. Figura tomada de Matano et. al. (2010).

Por el contrario, la descarga del Río de la Plata sí muestra una variación estacional en la forma y extensión de la zona que ocupa el flujo de agua dulce que ingresa a la región sobre la plataforma, conocida como la pluma del Río de la Plata (Guerrero et al., 1997, Piola et al., 2000, Guerrero et al., 2014) (Figura 4). Esta variación estacional de la pluma del RdIP está muy relacionada al cambio estacional que sufren los vientos superficiales en la región, sobre todo y principalmente los paralelos a la costa (Piola et al., 2005; Matano et al., 2014). Durante el invierno los vientos predominantes del sector SW/S arrastran la liviana y flotante descarga del RdIP hacia el norte sobre la costa brasileña, alcanzando inclusive latitudes menores a los $\sim 28^\circ\text{S}$. Para el verano los vientos predominantes del sector NE/N generan una descarga hacia el sur sobre la plataforma continental frente a la Provincia de Buenos Aires y hacia el E en dirección al océano abierto, pudiendo alcanzar el quiebre de plataforma y observarse una termoclina invertida a causa de la baja salinidad de superficie en perfiles de CTD (Piola et al., 2005), e incluso algún filamento de la descarga del RdIP puede alcanzar la CBM (Guerrero et al., 2014; Matano et al., 2014).

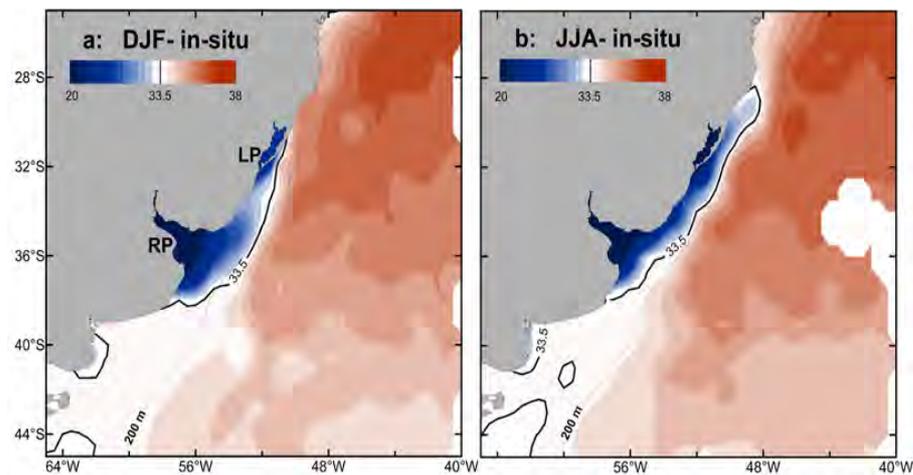


Figura 4: Variación estacional de la descarga del Río de la Plata: (a) verano (dic-ene-feb) e (b) invierno (jun-jul-ago). Se tomó como límite de la pluma la isohalina de 33,5. RP: Río de la Plata y LP: Laguna de los Patos. Figura tomada de Guerrero et. al. (2014).

El Frente Subtropical de Plataforma (STSF, sensu Piola et al., 2000) es una estructura permanente sobre la plataforma del ASO que muestra una variación temporal y espacial en consistencia con los principales factores que generan la variabilidad en la región (*i.e.* variabilidad estacional o ciclo anual) (Piola et al., 2000; Piola et al., 2008). El mismo fue descrito por Piola et al. (2000) en un análisis de datos oceanográficos históricos de la región de la plataforma continental del ASO. El frente tiene su origen en la dilución de las masas de agua transportadas por las corrientes de Brasil y Malvinas sobre la plataforma continental. Las aguas transportadas por dichas corrientes se mezclan con las aguas de escorrentía continental, dando origen al Agua Subtropical de Plataforma (ASTP) cuando la mezcla es con las aguas de la CB, y al Agua Subantártica de Plataforma (ASAP) cuando la mezcla ocurre con las aguas de la CM (Piola et al., 2000) (Tabla 1). Es decir, sobre la plataforma continental estas grandes corrientes se mezclan con aguas costeras que cambian sus características termohalinas dando origen a las nuevas masas de agua, que al encontrarse sobre la plataforma forman el STSF. En su descripción se pudo observar que el frente presenta una orientación general en la dirección N-S y se ha localizado su límite norte cerca de la costa en aproximadamente los $\sim 33^{\circ}\text{S}$ desde donde se extiende hacia el sur y quiebre de plataforma hasta aproximadamente $\sim 36^{\circ}\text{S}$ (Piola et al., 2000, 2008). El frente está presente desde casi la superficie, donde está generalmente “cubierto” por el agua de baja salinidad del RdIP y la Laguna de los Patos, hasta el fondo (Piola et al., 2000). A su vez en su límite norte se encuentra en aguas someras sobre la plataforma y en su progreso hacia el sur se acerca progresivamente hacia el borde de la plataforma continental del ASO, hasta aproximadamente los $\sim 36^{\circ}\text{S}$ donde deja la plataforma (Piola et al., 2000, Piola et al., 2008). Entre los 33°S y 34°S el STSF sigue las isobatas de 100 m y 200 m (Piola et al., 2000).

Tabla 1: Detalle de la variación estacional de invierno y verano del: Agua Subtropical de Plataforma (ASTP) y el Agua Subantártica de Plataforma (ASAP), del Agua de la Pluma del Río de la Plata (APRdIP) y del Agua Central del Atlántico Sur (ACAS) y Agua Tropical (AT), según Piola et al., (2000).

	INVIERNO		VERANO	
	T (°C)	S	T (°C)	S
APRdIP	10	33.5	10	33.5
AT	18.5	36	18	36
ASTP	14	33.5 – 35.3	18.5	33.5 – 36
	18.5	35.3 – 36	21	33.5 – 35.3
ASAP	14	33.5 – 34.2	21	33.5 – 34.2
ACAS	18.5	35.3	18.5	35.3

Al estudiar la variabilidad del frente Piola et al. (2008) han observado cierta variabilidad estacional en la zona y masas de agua del frente. Durante el invierno ASAP derivada del norte de la Patagonia forma una cuña fría y de de baja salinidad en toda la columna de agua que separa localmente a la externa ASTP del agua de plataforma interna y dulce proveniente del RdIP (Piola et al., 2008). A su vez, la mezcla del agua de las descargas del RdIP y la Laguna de los Patos con AT ocurre únicamente más allá del punto más al norte del ASAP pura, formando ASTP y una termoclina invertida característica de la zona (Piola et al., 2008). La distribución de salinidad en invierno controla la estructura de densidad creando un gradiente perpendicular a la costa que previene la mezcla a través del STSF (Piola et al., 2008). Durante el verano la dilución de AT ocurre a dos niveles, una cálida capa superficial asociada a mezcla de AT y la pluma de descarga del RdIP (algo más cálida que en invierno), y una más fría (~16°C) capa de salinidad mínima a ~40-50 m de profundidad creada por la mezcla de ASAP y ASTP a través del STSF (Piola et al., 2008). El hecho de que el frente esté “cubierto” en superficie

por una capa de baja salinidad dada por la pluma de descarga del RdIP (variable estacionalmente) dificulta su identificación usando imágenes satelitales. Así para poder estudiar la dinámica y variabilidad del STSF Piola et al. (2000) sugieren combinar los resultados de modelos de circulación oceánica con observaciones in-situ del frente. Aunque la interacción entre el STSF y las corrientes de Brasil y Malvinas no esté clara, se ha sugerido que la zona de influencia del frente es clave para entender un poco más acerca del intercambio entre la plataforma y el océano abierto (Matano et al., 2010).

2.1.2 El modelo numérico: Regional Ocean Model System (ROMS)

Los modelos numéricos hidrodinámicos son una herramienta computacional que permiten simular los procesos oceanográficos de mesoescala, plantear distintos escenarios y testear hipótesis, lo que los convierte en una herramienta muy interesante y útil para complementar las observaciones satelitales y las campañas oceanográficas.

El Regional Ocean Model System (ROMS), es un sistema de modelación especialmente desarrollado para realizar simulaciones precisas del océano en una escala regional. Resuelve las ecuaciones de movimiento de Navier-Stokes basado en la aproximación de Boussinesq y el balance hidrostático vertical de momento (Shchepetkin & McWilliams, 2005). A su vez posee y utiliza coordenadas sigma que siguen el trazado del terreno (batimetría y línea de costa). Existen al momento tres versiones de ROMS desarrolladas por distintos laboratorios, las mismas son ROMS_AGRIF, ROMS_RUTGERS y ROMS_UCLA. En éste caso se hará referencia al primero (ROMS_AGRIF), una versión francesa del modelo que cuenta con un conjunto de herramientas de sistema (ROMS_TOOLS) para hacer

el preprocesamiento de datos para proveer condiciones iniciales y de borde, y el postprocesamiento para el análisis de los resultados del modelo (<http://www.romsagrif.org/>).

En el presente trabajo se utilizará entonces el modelo Regional Ocean Model System en su versión ROMS_AGRIF 3.0 (<http://www.romsagrif.org/>, de aquí en adelante solo ROMS) para la simulación regional de la zona de estudio. El modelo a utilizar es de descarga gratuita y el sitio además cuenta con bases de datos globales de las variables oceanográficas y meteorológicas necesarias para ser utilizadas en las condiciones iniciales y de borde, así como también para los forzantes superficiales y la batimetría oceánica. De todas formas el modelo es flexible a utilizar cualquier base de datos en formato NetCDF para construir la grilla, las condiciones de borde, iniciales y los forzantes. A su vez el modelo permite definir una resolución horizontal y vertical de acuerdo al proceso que se desea simular y a la resolución que contenga la base de datos utilizada para las condiciones de frontera y los forzantes, permitiendo la representación de procesos oceanográficos de pequeña escala. Así es que el objetivo del capítulo es implementar una configuración hidrodinámica climatológica capaz de representar la variabilidad estacional de la región de estudio y del STSF utilizando el modelo ROMS.

2.2 Métodos

2.2.1 Configuración del ROMS:

En el presente trabajo la configuración de ROMS fue especialmente elegida para representar los procesos climatológicos que suceden en la plataforma del Océano Atlántico Sudoccidental, principalmente en la zona donde ocurre el STSF. Esto implica que los requerimientos de modelación deben estar orientados a resolver salidas del modelo a escalas de alrededor de los ~3 km. En este caso utilizamos una resolución final de $1/12^\circ$ en la región del STSF. Para poder obtener esta configuración se debe bajar la resolución de apoco y además es costosa computacionalmente. La solución frecuente es desarrollar un modelo de menor resolución y mayor dominio espacial (dominio "Padre") y usarlo como condición de borde para otras configuraciones de alta resolución (dominios "Hijos" anidados).

2.2.1.1 Grilla

La grilla del dominio Padre o grilla padre estuvo limitada en longitud entre los 68°W - 40°W y en latitud entre 22°S - 55°S (Figura 5). Tiene una resolución espacial de $1/3^\circ$ y 32 niveles sigma en la vertical, con una mayor resolución sobre la superficie. La grilla del dominio Hijo o grilla hija se extendió desde 64°W a 46°W y desde 26°S a los 42°S (Figura 5), con una resolución espacial de $1/12^\circ$ y 32 niveles sigma en la vertical, también con mayor resolución en superficie ya que es donde los gradientes de las variables a modelar son más intensos. El procedimiento de anidado llevado a cabo fue el de online una vía, en el cual el modelo padre se integra hacia adelante en un paso de tiempo tras el cual genera las

condiciones de contorno para el modelo hijo, que es integrado hacia adelante los pasos de tiempo necesarios para alcanzar al modelo padre. Las propiedades de flujo y volumen se conservan entre las grilla padre e hija. La topografía utilizada en ambas grillas se generó a partir la base de datos de ETOPO2, que tiene una resolución horizontal de dos minutos de arco (aprox. $1/30^\circ$), es derivada de sondeos y observaciones gravitacionales satelitales y se encuentra dentro de la base de datos en el paquete de descarga de ROMS (Figura 5).

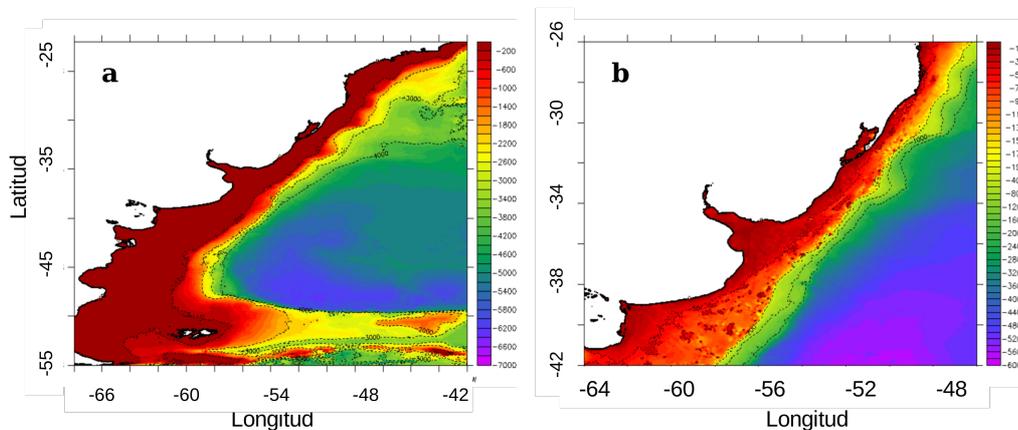


Figura 5: Batimetría (m) del Atlántico Sudoccidental a partir de etopo2 (2' de resolución) graficada en los dominios de las grillas Padre (resolución $1/30^\circ$) (a); e hija (resolución $1/12^\circ$) (b).

2.2.1.2 Condición de borde y forzantes

Como condición de borde del domino padre se utilizaron los campos climatológicos (medias mensuales) de temperatura y salinidad del WOA2009 (World Ocean Atlas 2009, NOAA). Este es un conjunto de datos de frecuencia anual, estacional y mensual, grillados (de 1° de resolución horizontal) a niveles estandarizados de profundidad, provenientes de observaciones in-situ de temperatura, salinidad, oxígeno

disuelto, utilización aparente de oxígeno (AOU), porcentaje de saturación de oxígeno, fosfatos, silicatos y nitratos. En la vertical la base de datos posee 24 niveles.

Los forzantes atmosféricos y oceánicos utilizados se obtuvieron del Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS05). El mismo posee una resolución espacial horizontal de 0,5°. Es un conjunto de datos océano-atmósfera completo, compilado a partir de los informes de barcos sobre el océano mundial (da Silva et al., 1994). El conjunto de datos consta de climatologías mensuales a partir de datos recogidos entre 1946 – 1989 para: velocidad meridional (u), velocidad zonal (v), velocidad del viento, presión a nivel del mar, temperatura superficial del mar, temperatura del aire y humedad. Se utilizó la climatología de COADS05 para todos los campos a excepción del forzante para la salinidad para el cual se utilizó una climatología construida a partir de datos medidos en la región (Figura 6). Para una descripción detallada de los datos de salinidad ver Palma et. al. (2008). Vale la pena aclarar que no se incluyeron fuentes puntuales adicionales como ser la descarga del Río de la Plata y Laguna de los Patos, así como tampoco se incluyeron las mareas que son de muy baja amplitud para la región del STSF y no tendrían mayor influencia (Palma et al., 2004).

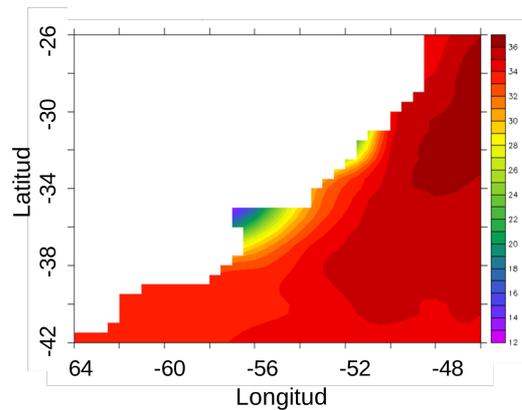


Figura 6: Se muestra la media anual del archivo mensual de la salinidad superficial utilizada como forzante de salinidad, grilla hija.

2.2.1.3 Condiciones iniciales

Para la condición inicial se utilizó el archivo de World Ocean Atlas 2009 (WOA2009). Ésta librería consta de un set de campos climatológicos de medidas in situ y una resolución de 1° de grilla de: temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, utilización aparente de oxígeno, porcentaje de saturación de oxígeno a niveles estandarizados de profundidad para períodos anuales, estacionales y mensuales de todo el océano.

Con esta configuración se realizó una corrida del modelo ROMS anidado online de una vía de 16 años. La misma puede subdividirse en dos períodos de ocho años. El primero es aquel en el cual luego de 8 años el modelo alcanza el estado de equilibrio o spin-up donde las variables se estabilizan. El segundo (del año 9 al 16) es aquel en el que el modelo ya puede ser evaluado y por tanto los resultados de este último fueron utilizados para la validación del mismo. Los archivos fueron almacenados en medias mensuales y cada 5 días.

Para el análisis biofísico (acople con Ichthyop) se configuró el modelo anidado para que corra a partir del año 9 de simulación (luego de alcanzado del spin-up) por un período de tres años pero ahora los archivos fueron almacenados con una frecuencia diaria. A ésta nueva corrida la llamaremos Corrida de Análisis (CA) ya que será utilizada para el análisis de los patrones biológicos. Tener un paso de tiempo diario nos permitirá hacer experimentos en plazos cortos de tiempo a una escala adecuada al tiempo de desarrollo de los individuos a estudiar. La CA podría haber sido más extensa en el tiempo pero se debe recordar que es muy costoso computacionalmente almacenar archivos diarios y a su vez cada 5 días se pierde mucha de la variabilidad de alta frecuencia ya que se suavizan los campos. Las variables analizadas para evaluar la performance del modelo serán las componentes de la velocidad de las corrientes (u , v), la temperatura (T), la salinidad (S) y la altura del nivel del mar (SSH).

Para la realización de éste trabajo (corridas de ROMS) se utilizó un computador Intel Core i7-3770 3,4 GHz, 4 núcleos y 8 hilos, con un disco duro Sata2 de 4 TB, que estuvo destinado únicamente al funcionamiento del modelo ROMS.

2.2.2 Validación del ROMS

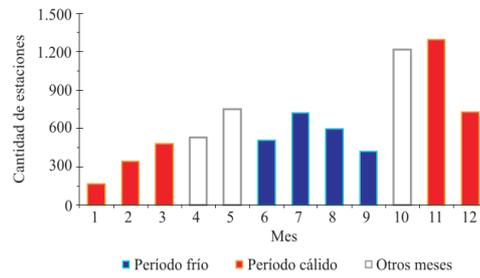
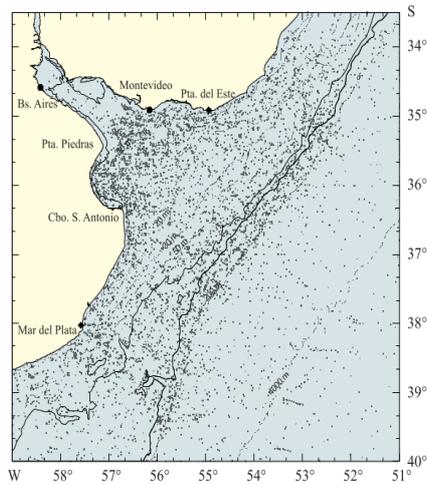
Un punto relevante en un sistema de modelación biofísica es la validación del modelo hidrodinámico, ya que debe rescatar los principales rasgos espaciales y temporales del sistema (Gallego et al., 2007). Como la simulación a realizar en este trabajo es de carácter climatológico, se contrastó las variables de salida temperatura, salinidad y velocidades horizontales (u y v) salida del modelo ROMS con datos publicados en

trabajos regionales referentes a la oceanografía de la zona de estudio. A su vez la SSH se comparó con un reanálisis que asimila datos oceánicos y salidas de modelos oceanográficos globales (Global Ocean Physics Reanalysis, CGLORS) para evaluar el campo de altura del nivel del mar (ssh). El reanálisis tiene una resolución horizontal de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ y 50 niveles verticales. El reanálisis cubre el período 1978-2012 con una resolución temporal mensual. Los datos de SSH asimilados provienen del satélite AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>).

2.2.2.1 Análisis comparativo entre las salidas de ROMS y una climatología del Río de la Plata y su Frente Marítimo (Guerrero et. al., 2010)

Para un análisis más completo de los campos de temperatura y salinidad se realizó además un análisis comparativo de las salidas del modelo con un atlas climatológico de temperatura y salinidad en el Río de la Plata y su Frente Marítimo (Guerrero et al., 2010). La región en el atlas comprende el Río de la Plata (RdIP) y su Frente Marítimo, más precisamente se encuentra entre $33.48^\circ\text{S} - 39.30^\circ\text{S}$ y $51^\circ\text{W} - 59^\circ\text{W}$. La información de dicho atlas proviene de un total de 7.757 estaciones oceanográficas correspondientes a 366 campañas. De éstas, más de 5.600 corresponden a datos de CTD y 2.100 corresponden a estaciones realizadas con botellas. La distribución temporal de la cantidad de estaciones realizadas es entre 1911 y 2003. Los autores consideran relevante dividir los datos en dos períodos principales: uno frío que corresponde a los meses de junio, julio, agosto y setiembre; y uno cálido que corresponde a los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo. Además tras evaluar una serie histórica de datos de caudal del RdIP, separan en períodos de caudal normal, alto y bajo, considerando que dicho factor es relevante

hasta los 50 m de profundidad (Figura 7). Para una información más detallada del atlas ver Guerrero et al. (2010). Debemos tener en cuenta la distribución de los datos (Figura 7), donde se observa que los datos están más concentrados sobre la costa y plataforma continental, más alejados de la costa ya son más escasos con una acentuada disminución en regiones profundas. Para un mejor análisis de la performance del modelo en comparación con el atlas, se ajustó la región de este último para que sea la misma que en el atlas climatológico. A su vez se calcularon los campos horizontales con los mismos períodos cálido y frío definidos en el atlas. Los cálculos fueron realizados utilizando la herramienta de visualización de datos ferret (<http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/home>).



Índice de caudal (IQ)	Rango de caudal ($m^3 s^{-1}$)	Percentil
Caudal bajo (-1)	$IQ \leq 17.370$	25
Caudal normal (0)	$17.370 < IQ < 28.000$	25 a 75
Caudal alto (1)	$IQ \geq 28.000$	75

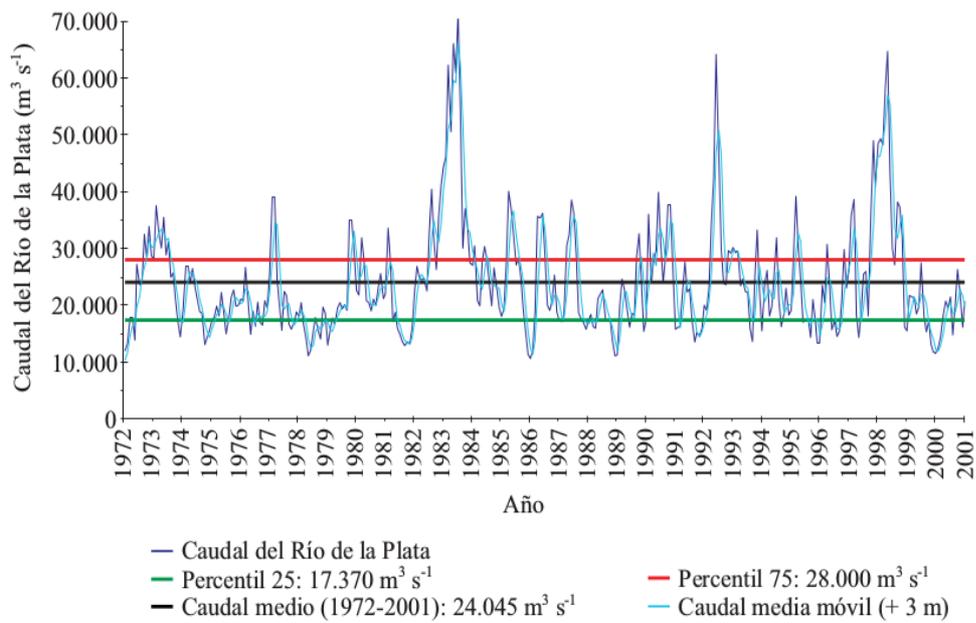


Figura 7: Descripción del atlas climatológico del RdIP y su Frente Marítimo a ser utilizado para evaluar la performance de ROMS en los campos horizontales de temperatura y salinidad horizontales. La figura muestra los puntos donde están distribuidos los datos, los períodos del año que fueron definidos como cálido y frío, la serie temporal de descarga del RdIP y el índice de caudal (IQ) por el cual se definió si el caudal era normal, alto o bajo. Tomado de Guerrero et. al. (2010).

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Altura del nivel del mar (SSH)

La forma en la cual el modelo representa la Confluencia de Brasil-Malvinas (CBM) es un aspecto muy importante ya que la misma constituye la estructura principal del ASO y la dinámica de la zona está muy afectada por la misma. La altura del nivel del mar (SSH por su sigla en inglés) es utilizada como proxy de la posición de la Confluencia de Brasil-Malvinas (CBM), cuya posición media observada es en los $\sim 38^{\circ}\text{S}$ (Olson, 1988). A su vez, el desvío estándar de SSH es una medida de la variabilidad de las corrientes geostróficas en superficie (Figura 8b). De esa forma, se han graficado ambos campos resueltos por el modelo tanto en la grilla padre como en la hija. En la figura 8a pueden distinguirse dos regiones alrededor de $\sim 38^{\circ}\text{S}$, una con $\text{SSH} > 0$ y otra con $\text{SSH} < 0$ y el límite entre ambas marca la posición media de la CBM. La primera se corresponde con la zona de influencia de la CB, mientras que la negativa se corresponde a la zona de influencia de la CM. La posición promedio de la CBM se encontró a la latitud observada, sobre el quiebre de plataforma y talud continental, donde se encuentra el mayor gradiente de SSH (Figura 8a). Las magnitudes medias de SSH se encuentran dentro de las mencionadas para la zona y región (Saraceno et al., 2005; Palma et. al., 2008 y refs.). Respecto al reanálisis, el modelo parece sobreestimar los valores positivos de SSH, mientras que los negativos se asemejan más, de todas formas el patrón general está bien representado en el modelo respecto al reanálisis, así como la posición de la CBM (Figura 8c). Los desvíos estándar representados por el modelo muestran una ubicación geográfica y magnitud similares a las obtenidas por el reanálisis (Figura 8b, d) y son coincidentes con que los mayores valores se encuentran en la zona de la confluencia. Si observamos la grilla hija en la figura 8e, g, la

misma se muestra como un zoom de la grilla padre y también puede observarse la confluencia a la latitud citada, el desvío estándar se encuentra dentro de los valores y región observados a la vez que son coincidentes con los datos del reanálisis (Figura 8f, h).

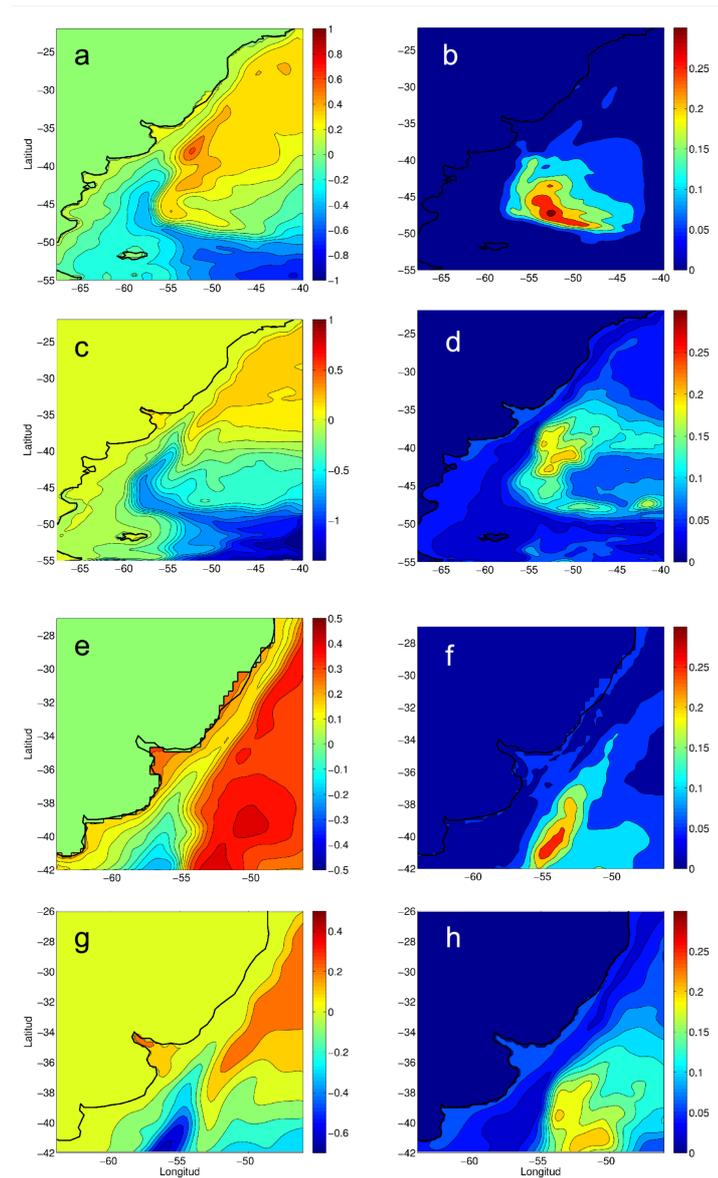


Figura 8: Altura del nivel del mar (SSH) media (a) y desvío estándar de SSH (b) de la corrida control de ROMS para la grilla padre. SSH media (c) y desvío estándar de SSH (d) obtenida a partir del reanálisis CGLORS acotado a la grilla padre. SSH media (e) y el

desvío estándar de SSH (f) de la corrida control de ROMS para la grilla hija. SSH media (g) y desvío estándar de SSH (h) obtenida a partir del reanálisis CGLORS acotado a la grilla hija. Notar que la escala de SSH de CGLORS es algo distinta a la del modelo, esto es porque el reanálisis presenta algunos valores menores en algunas zonas.

2.3.2 Velocidad superficial (u, v) grilla padre

La velocidad v (o meridional) tiene un patrón claro y dominante, la Corriente de Brasil. El modelo representa la corriente de contorno oeste muy definida en todo el dominio, estrecha y fluyendo muy ligada al borde de plataforma casi sin despegarse de la misma (Figura 9 a, b). La CB se identifica desde el límite norte de la grilla hasta aproximadamente los $\sim 38^\circ\text{S}$ en la CBM donde se separa de la plataforma. Más al sur de dicha separación la velocidad se intensifica, alcanzando los valores más altos ($\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Una vez que deja la plataforma en la CBM, el cambio de signo se da aproximadamente a los $\sim 45^\circ\text{S}$, donde es detenida por la Corriente de Malvinas en una región de gran variabilidad como puede observarse en el desvío estándar (Figura 9 c,d). La CM ocupa la plataforma al sur de $\sim 38^\circ\text{S}$, se muestra aparentemente más débil que la CB con valores máximos que no parecen superar los $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. El desvío estándar muestra que la región de la CBM es la de mayor variabilidad, mientras que la CB fluye a una velocidad casi constante hasta su separación de la plataforma, reflejado por un mínimo en el desvío estándar (Figura 9 c).

La velocidad u (o zonal) sobre el norte de la plataforma muestra predominantemente un valor negativo (con una magnitud de aproximadamente los $-0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la banda estrecha que representa la Corriente de Brasil hasta aproximadamente $\sim 38^\circ\text{S}$, es decir el agua en superficie se mueve hacia la costa. Se observa un brusco cambio de

dirección en el borde oeste de la corriente, similar al que se observa en la componente meridional (el agua se mueve alejándose de la costa). Más al sur de 38°S sobre la plataforma la componente tiende a cambiar a signo positivo pero con valores cercanos a cero, a excepción del borde de plataforma donde existen frentes estrechos (podría observarse el frente del talud argentino por ej.). Los valores máximos ($\sim 1 \text{ m.s}^{-1}$) se observan en la zona más sur de la confluencia, donde “nace” la Corriente del Atlántico Sur y la velocidad zonal se hace “más positiva” entre los frentes de la Corriente de Brasil y Subantártico (Saraceno et al., 2004). Se refiere a esta zona alrededor de los $\sim 44^\circ\text{S}$ donde la CB toma dirección NE como “overshoot of the Brazil Current” (Saraceno et al., 2004).

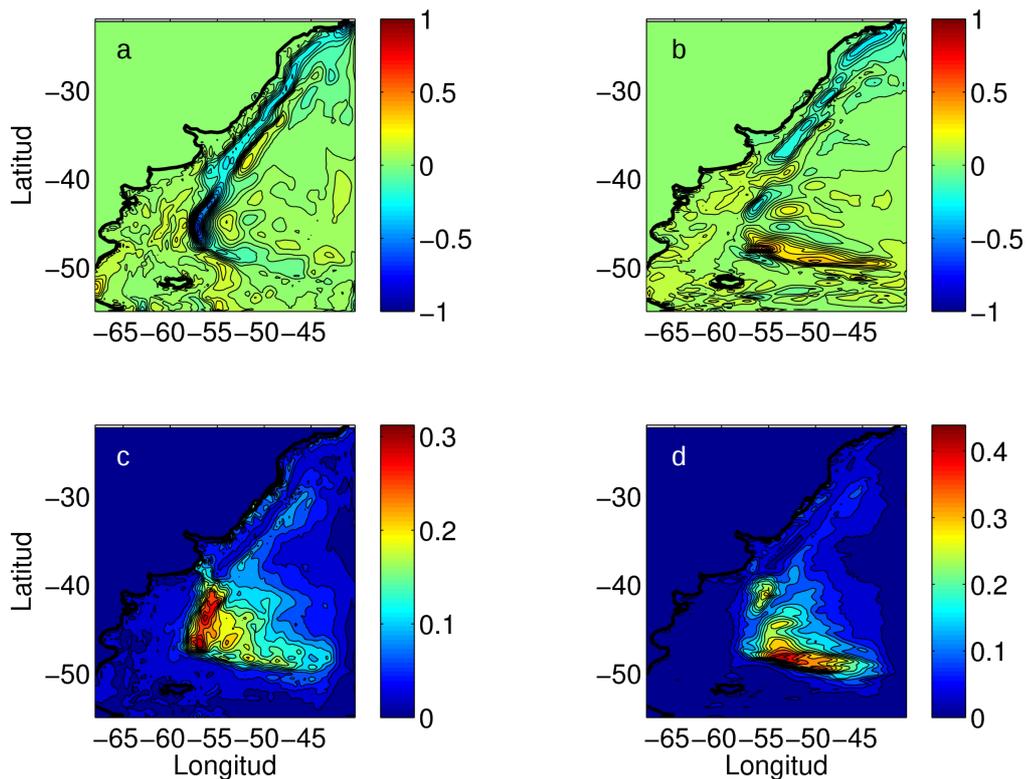


Figura 9: Velocidad superficial media v (a) y su desvío estándar (c), velocidad superficial media u (b) y su correspondiente desvío estándar (d), para la grilla padre. Las unidades son m.s^{-1} .

El desvío estándar para ambas componentes es máximo en la zona de la confluencia de Brasil Malvinas, algo esperable debido a los cambios bruscos en la dirección de las corrientes debido a los flujos antagónicos de las corrientes, propiedades termohalinas contrastantes de ambas e intensos meandros y anillos que son formados allí mismos. Esta región coincide con la que tiene mayor variabilidad en altura del nivel del mar.

2.3.3 Velocidad superficial (u, v) grilla hija

En la grilla hija la componente v superficial muestra también una CB muy definida en el borde de la plataforma con máximos que pueden alcanzar $\sim 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el núcleo de dicha corriente (Figura 10). En la plataforma interna del norte argentino se observa una corriente opuesta de menor magnitud entre el límite sur del dominio (42°S) y los $\sim 34^\circ\text{S}$, mientras que más al norte el patrón es variable o difuso. Se observa también un máximo negativo centrado en $\sim 41^\circ\text{S} - \sim 55^\circ\text{W}$, región donde la CB ya se separó de la plataforma y se le une una celda de circulación de la CM para formar la Corriente del Atlántico Sur. Esto último puede observarse complementariamente en la componente zonal u superficial, donde en la región de la CBM ($\sim 38^\circ\text{S}:40^\circ\text{S}$) hay una velocidad positiva (o sea hacia el E) que podría ser la recirculación de la corriente una vez que se encuentra con la CB (Figura 10).

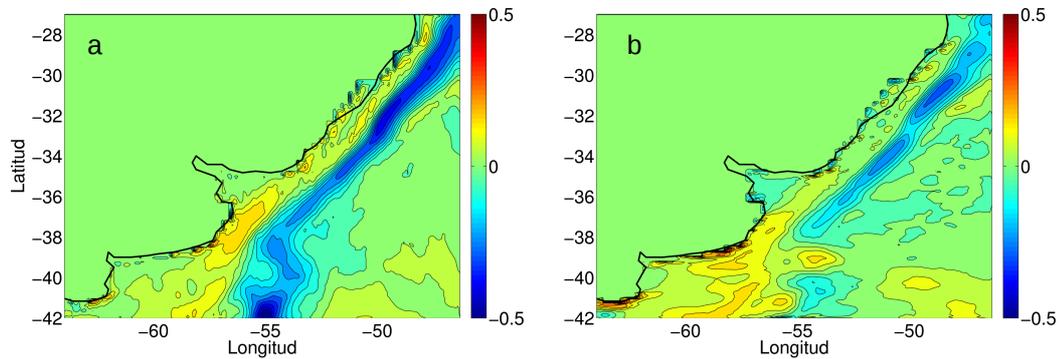


Figura 10: Componentes de la velocidad media para la superficie v (a) y u (b) para la grilla hija.

2.3.4 Módulo de la velocidad

El módulo de la velocidad media muestra al igual que la componente meridional una corriente de contorno oeste muy definida, con máximos entre los 25°S-35°S. Se puede observar la zona de la CBM (~38°S) donde el módulo disminuye y se separa de la plataforma continental (Figura 11). En el límite sur de la región, entre 56°W-54°W se observa un máximo en el módulo de la velocidad. Esto puede ser debido a la celda de recirculación de la CM al sur de la confluencia, que intensifica la corriente y es donde comienza a generarse la CAS. A su vez sobre la costa del norte argentino existe una corriente que debería ser la rama costera de la CM, que no se detiene totalmente en la confluencia y puede seguir su trayectoria norte sobre la plataforma (Palma et al., 2008). La región con la máxima variación se concentra en la zona de confluencia, donde incluso en algunos lugares la magnitud de la variación supera al módulo (Figura 11). La gran variabilidad es debida la confluencia en sí misma, reconocida como una de las zonas más energéticas de los océanos (Chelton et al., 1990, Saraceno et al., 2004). Dos corrientes que fluyen en sentido opuesto se encuentran en dicha zona, generando la formación de

frecuentes y numerosos eddies que sumado a la interacción de las corrientes hacen a la variabilidad de la región (Campos et. al., 2000; Oliveira et al 2009).

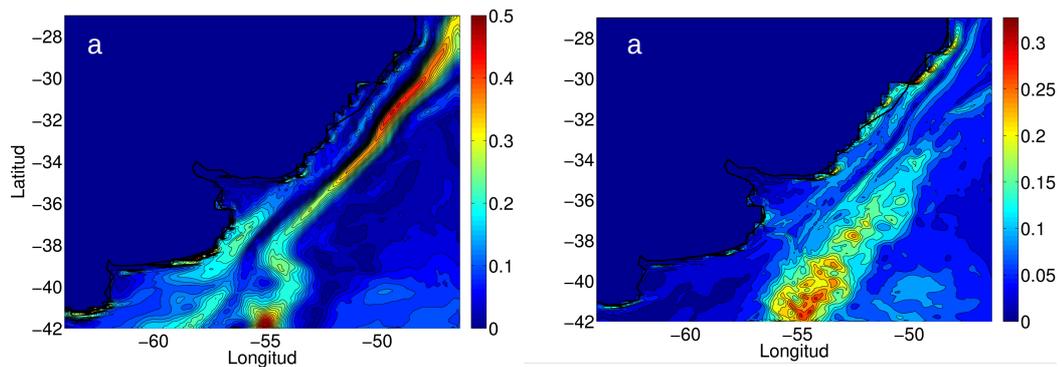


Figura 11: módulo de la velocidad superficial (m.s-1) (a) y su correspondiente desvío estándar (b).

Entre el verano y el invierno hay una inversión de la dirección de las corrientes sobre la plataforma sur brasileña a causa de la influencia sobre la zona de las corrientes de Brasil y Malvinas o posición de la confluencia. Esto genera una gran redistribución de las características hidrográficas de la zona y por tanto del comportamiento del ambiente costero (Castro et al., 2006). El modelo capta dicha inversión de las corrientes entre una y otra estación sobre la plataforma sur brasileña, mientras que en el resto de la región puede observarse una reducción del flujo hacia una u otra dirección (Figura 12).

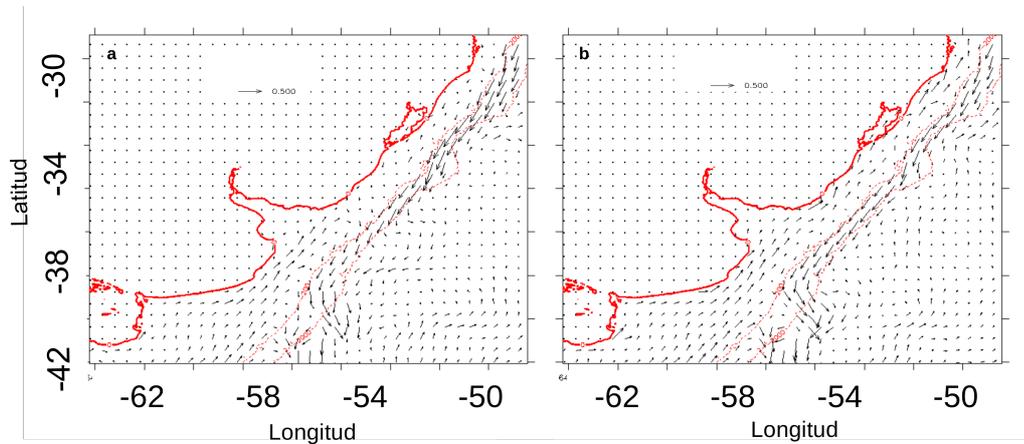


Figura 12: Vectores de velocidad para el trimestre de verano (a) y el trimestre de invierno (b). Las unidades están en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Las líneas punteadas indican las isobatas de 200 m y 2000 m.

2.3.5 Transportes de volumen

Para el cálculo de los transportes de volumen (en Sverdrups, $1 \text{ Sv} \sim 10^6 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) se tomaron transectas perpendiculares a la costa a distintas latitudes para ambas grillas y se calcularon los transportes sobre las mismas desde superficie hasta los 1000 m de profundidad (considerando que la CB está confinada a dicha profundidad) (Castro et al., 2006). Con fines comparativos se muestra una tabla con valores calculados para el transporte de las corrientes de Brasil y Malvinas tomada y modificada de Maamaatuaiahutapu et. al. (1998) y Castro et al. (2006).

Tabla 2: Transportes de las corrientes de Brasil y Malvinas entre 33°S y 46°S. Tomado y modificado de Maamaatuaiahutapu et. al. (1998) y Castro et al. (2006).

	Prof. De referencia (m)	Transporte (Sv)	Referencia
C. de Brasil			
28° - 30°S	1550 - 1600	11,4	Fisher (1964)
32°S	1700	14,7	Fisher (1964)
32°S	1000	13	Evans et al., (1983)
32°S	1600	19,2	Stramma (1989)
33°S	1600	17,5	Stramma (1989)
34°S	1700	15	Zemba (1991)
34°S	Fondo	42	Zemba (1991)
35,2°S	1000	23	Garzoli (1993)
36°S	1400	13	Zemba (1991)
36°S	Fondo	112	Zemba (1991)
36,5°S	1000	23	Garzoli (1993)
38°S	1400	19	Gordon & Greengrove (1986)
38°S	800	18	Garzoli & Garrafo (1989)
38°S	3000	70	Peterson (1992)
C. de Malvinas			
38°S	1000	20	Garzoli (1993)
38°S	1000	>5	Garzoli (1993)
42°S	1400	10	Gordon & Greengrove (1986)
42°S	3000	75	Peterson (1992)
45°S	Fondo	60	Saunders & King (1995)
46°S	1400	10	Gordon & Greengrove (1986)
46°S	3000	88	Peterson (1992)

En la tabla 2 se resalta la gran variabilidad de algunos de los transportes publicados para ambas corrientes, dando cuenta de la gran variabilidad que tienen las corrientes en la región. Los transportes generados por el modelo se encuentran dentro del rango variable y citado previamente (Tabla 2). En la grilla padre el transporte aumenta con la latitud desde -20,4 Sv (el signo negativo indica dirección sur) a los ~28°S a -29.4 Sv en

los $\sim 34^{\circ}\text{S}$ (Figura 13). Lo cierto es que existe una gran variación entre en cuanto al transporte de volumen a dichas profundidades.

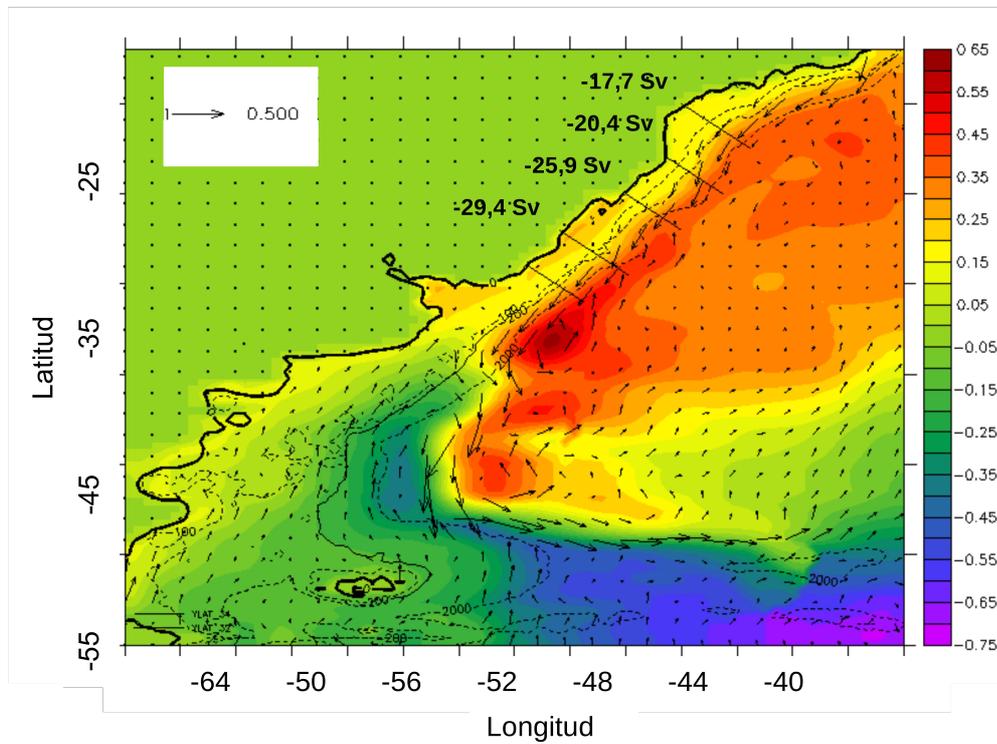


Figura 13: SSH media (m) de ROMS y las velocidades superficiales medias ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) para la grilla padre. Las líneas continuas negras indican las secciones perpendiculares a la costa para las cuales se calcularon los transportes en los primeros 1000 m de profundidad. El valor de los transportes es el indicado en la figura en Sverdrups ($1\text{ Sv}\sim 1\times 10^6\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

Cuando observamos las secciones verticales sobre las cuales fue calculado el transporte (Figura 14), se puede observar que el núcleo de la CB está muy pegado al quiebre de plataforma continental también en profundidad, y confinado a los primeros 1200 m, donde la corriente cambia de signo. Sobre la plataforma se observa el valor positivo de la rama costera de la CM, con valores máximos medios en el núcleo para dichas secciones que no superan los $\sim 0,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

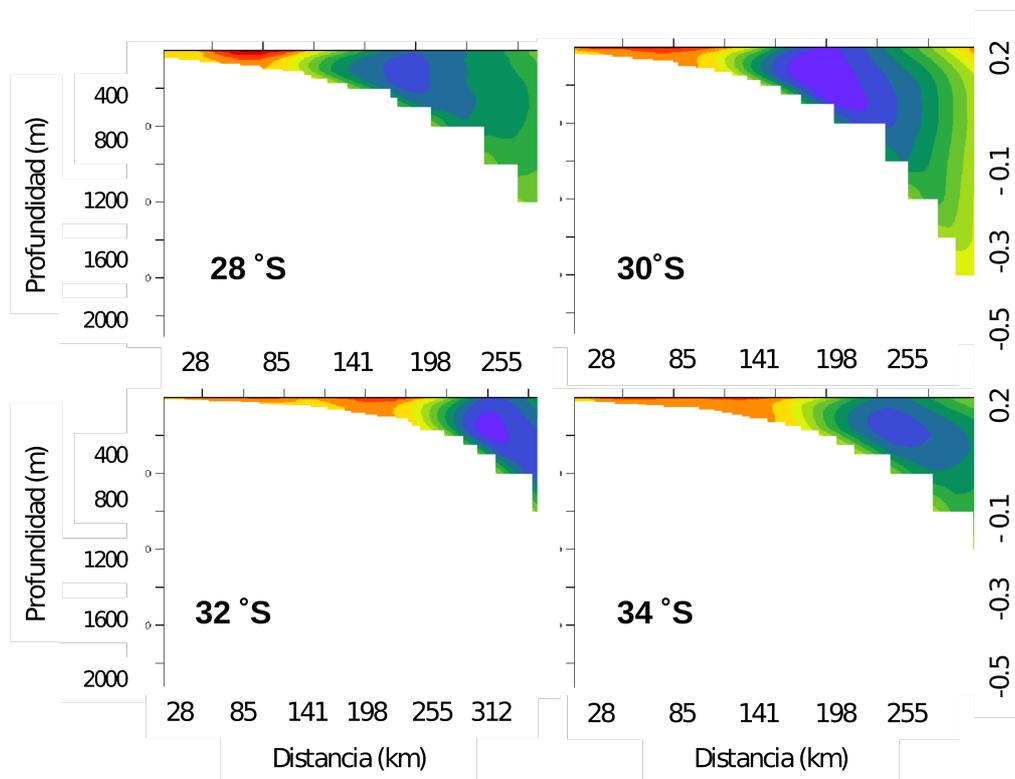


Figura 14: Secciones verticales de velocidad ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a latitudes fijas donde fueron calculados los transportes perpendiculares a la costa (figura 14) (28°S , 30°S , 32°S y 34°S).

2.3.6 Análisis estacional en la grilla hija

2.3.6.1 Salinidad Superficial

El modelo da cuenta de la variabilidad estacional observada de la pluma, mostrando que durante el verano la isohalina de 33 alcanza latitudes máximas cercanas a los $\sim 29^{\circ}\text{S}$, ensanchándose sobre la plataforma continental (hacia el Este) (Figura 15 b). A su vez, al norte de $\sim 29^{\circ}\text{S}$ la salinidad alcanza valores mayores o iguales a 35 en concordancia con lo descrito por Piola et al. (2000). Los menores valores se observan en la

parte interna del estuario, con valores de 10 a 30 en la parte externa. También se observan valores menores a 30 en los alrededores de la Laguna de los Patos.

En invierno puede observarse la presencia de una lengua de baja salinidad ($S < 33.5$) que se esparce desde la boca del estuario hacia el norte sobre la plataforma interna hasta más allá del límite norte del dominio. Los menores valores se encuentran en el Río de la Plata interior ($S \sim 10$) y se extienden en una banda estrecha sobre la plataforma sur brasileña ($S < 32$) (Figura 15 a). También es evidente un gradiente a medida que nos alejamos de la boca del estuario hacia aguas más profundas, indicando el frente salino en la boca del río. A su vez, puede observarse el límite externo de la pluma a través de un fuerte gradiente salino sobre el quiebre de plataforma, que es coincidente con el gradiente en temperatura. Moller et al (2008) atribuyen estos gradientes a los límites que marcan la transición entre SASW y TW, el STSF y la zona de mezcla entre el agua de descarga del RdIP y TW, donde se forma el STSF.

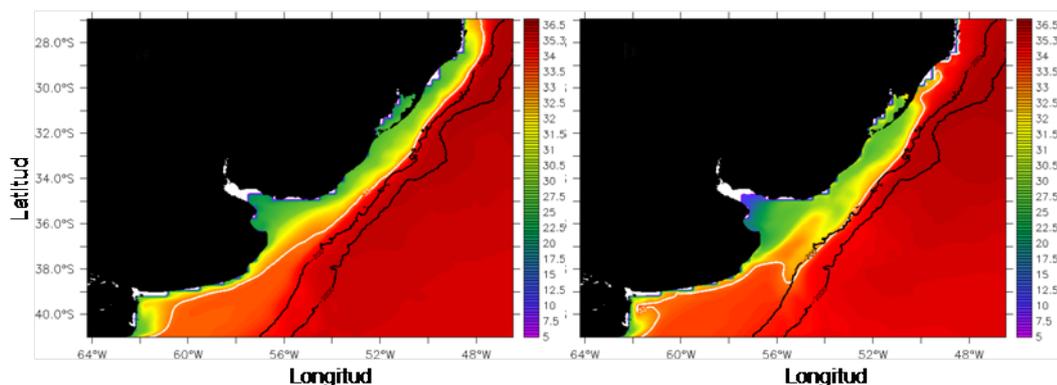


Figura 15: Salinidad para las estaciones de invierno (a) e verano (b). La línea blanca en las figuras de verano e invierno indica la isohalina de 33, representando las aguas diluidas de plataforma que sirve como proxy del alcance de la pluma de descarga del RdIP.

Vale la pena destacar que aunque el modelo no contiene la descarga adicional de agua dulce del RdIP y ni de la Laguna de los Patos, la distribución horizontal de salinidad en las distintas estaciones del año está bien representada por el mismo. Esto es gracias a que los datos de salinidad de superficie, condición de borde para el modelo, incluyen indirectamente las descargas. Si fuéramos a hilar más fino en la región más interna del estuario del RdIP, si bien hay momentos en los que la salinidad es menor a 10 (campos no mostrados aquí), los valores generalmente observados son más altos que los que pueden registrarse en dicha zona. Sin embargo a una escala de plataforma continental, con un buen archivo de forzante para la salinidad superficial y con un tiempo de relajación en la configuración del modelo de 60 días, el modelo reproduce en forma correcta la variabilidad en la salinidad superficial de la plataforma continental del Atlántico Sudoccidental (Figura 16).

El desvío estándar de la salinidad superficial (SSS), muestra que las zonas de mayor variabilidad se da en el RdIP interior y la Laguna de los Patos. También se observa variabilidad aunque algo menor que en la boca de los estuarios en la zona de influencia de la pluma del Río de la Plata y la descarga de la Laguna de los Patos (Figura 16). Es decir la región donde existe variabilidad de salinidad marca las regiones que están sujetas a la variabilidad estacional vista anteriormente y eso explica el porqué son éstas las de mayor valor.

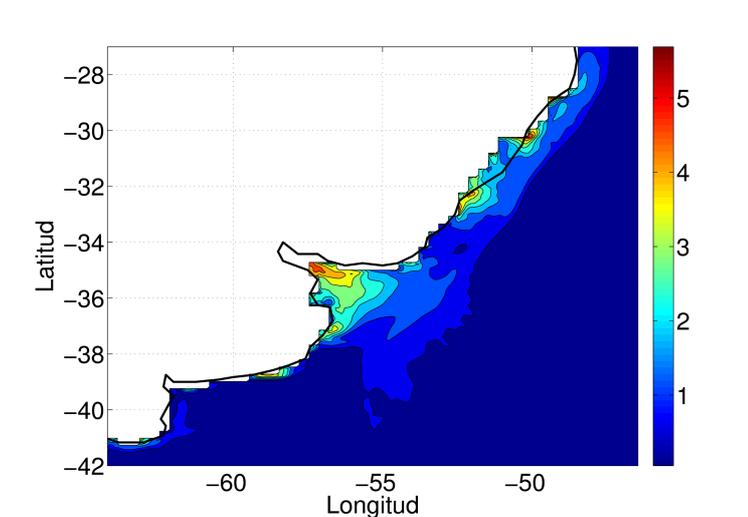


Figura 16: Desvío estándar de la salinidad superficial media.

2.3.6.2 Temperatura superficial

La temperatura superficial resuelta por el modelo representa adecuadamente la gran variabilidad estacional de dicha variable en la región (Figura 17). Sobre la plataforma continental puede observarse que existen zonas con una amplitud que superara los $\sim 9^{\circ}\text{C}$ entre el máximo (trimestre de verano) y el mínimo (trimestre de invierno), estando en concordancia con la descripción para la temperatura en la región (Piola et al., 2000).

En el trimestre de verano (diciembre, enero, febrero) donde predominan los vientos del sector NE en la región, la influencia de las aguas cálidas ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) transportadas por la CB hacia el sur es más intensa (Lentini et. al. 2000). La temperatura superficial del mar (TSM) en la porción norte del dominio sobre la plataforma sur brasileña y en aguas uruguayas es mayor a los $\sim 20^{\circ}\text{C}$ y en toda la región es mayor a 15°C . Las isotermas tienen el aspecto de que el agua está siendo advectada hacia el sur, sobre todo en

la zona de mayor influencia de la corriente de Brasil. Lo contrario ocurre en la región sur contra el continente donde las isothermas tienen el aspecto de aguas que fluyen al norte, aunque no en forma tan aguda como las que fluyen al sur. En el trimestre de otoño (marzo, abril, mayo) se destaca cómo las aguas frías del sur comienzan a ganar terreno en la parte interna de la plataforma continental, estando la isoterma de 15°C frente al RdIP y se observan temperaturas menores a los 10°C. Sobre el talud todavía se observan aguas cálidas (mayores a 20°C), generándose un gradiente térmico importante entre la parte interna y externa de la plataforma continental. Observando el trimestre de invierno (junio, julio y agosto) es evidente de que el otoño es una estación de transición de los valores extremos de verano a los valores extremos del invierno. Durante el invierno la influencia de los vientos paralelos a la costa del sector SW es mayor. Puede observarse en el modelo una intrusión de aguas frías subantárticas sobre la plataforma continental transportadas por la rama costera de la Corriente de Malvinas. Dicha intrusión adquiere forma de cuña sobre la costa a medida que disminuye la latitud, con temperaturas sobre la plataforma <15°C hasta los ~30°S. Se destaca un intenso frente en la plataforma externa frente al RdIP que se extiende hacia el N y entra a la plataforma media del sur brasileño, Moller et al (2008) observa el mismo patrón para el invierno. Temperaturas menores a 11°C dominan la región sur del dominio con una forma de cuña que indica su flujo hacia el norte en la llamada Corriente Patagónica (Moller et a., 2008). Al observar las temperaturas, forma y gradientes de las isothermas del trimestre de primavera (setiembre, octubre y noviembre) se puede observar el comienzo de una transición hacia la configuración de verano. Es como un patrón opuesto al otoño con aguas relativamente más frías sobre la plataforma continental brasileña. Aquí aguas relativamente cálidas se dirigen hacia el sur del dominio, la isoterma de 15°C está al sur de ~32°S. El modelo reproduce en forma correcta la variación estacional de la TSM

en la región de estudio, en parte pues es forzada con condiciones observadas en superficie (Figura 17). Puede observarse que el verano y el invierno son las estaciones donde se registra la predominancia de aguas con mayor y menor temperatura en la región. A su vez, por la forma de las isotermas puede inferirse la circulación tal como es descrita en la bibliografía. Se observa un patrón general que es el gradiente entre las aguas tropicales de la CB y las aguas de la plataforma continental.

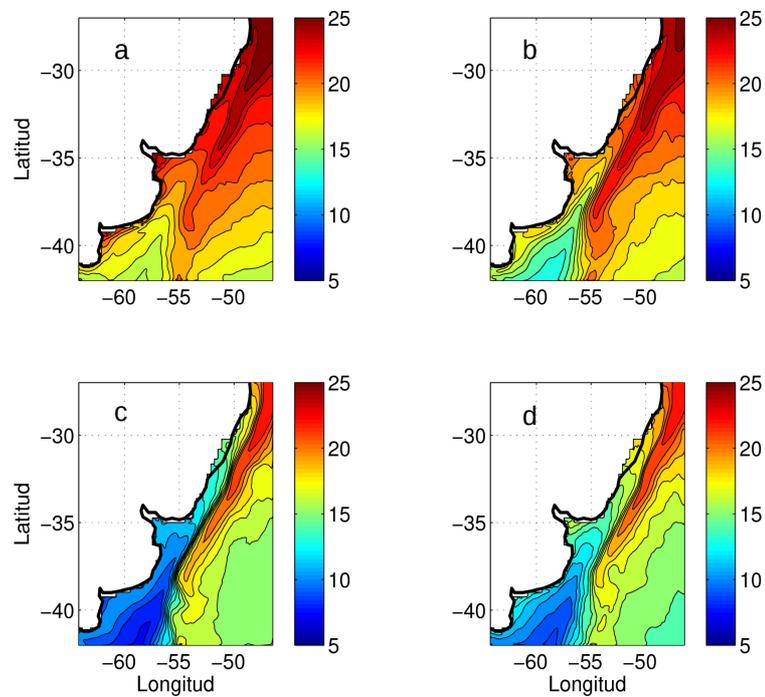


Figura 17: Temperatura superficial en la grilla hija para cada estación del año: a) verano, b) otoño, c) invierno y d) primavera.

2.3.7 Resultados del análisis comparativo entre las salidas de ROMS y una climatología del Río de la Plata y su Frente Marítimo (Guerrero et. al., 2010)

2.3.7.1 Temperatura superficial Período frío

En términos generales, el modelo representa las características del período frío de superficie adecuadamente (Figura 18). Con temperaturas mínimas al sur de la región cercanas a los ~ 9 °C similares a las mostradas por el atlas en las tres configuraciones de caudal y donde la isoterma de 10 °C no sobrepasa los ~ 36 °S. Las temperaturas máximas en el modelo parecen ser levemente mayores en la zona norte de la región, más precisamente sobre el talud continental, donde existe una fuerte influencia de la CB. A su vez las temperaturas comienzan a bajar a medida que nos movemos al E hacia el océano abierto, quizás pareciéndose más al caso de caudal bajo (hay que tener en cuenta la escasez de datos en la plataforma externa y talud continental). Las isotermas en el borde de la plataforma y talud se encuentran paralelas a la costa, evidenciando la influencia de los vientos predominantes de invierno (S-SW). La zona de mayor gradiente de temperatura entre la plataforma continental y el océano abierto en el modelo se encuentra algo desplazada hacia el W (como si la CB estuviera “apretando” las aguas contra la plataforma) y centrado aproximadamente entre 56°W - 54.5°W , mientras que en el atlas la misma región se encuentra más expandida y centrada aproximadamente entre 54.5°W - 53.5°W .

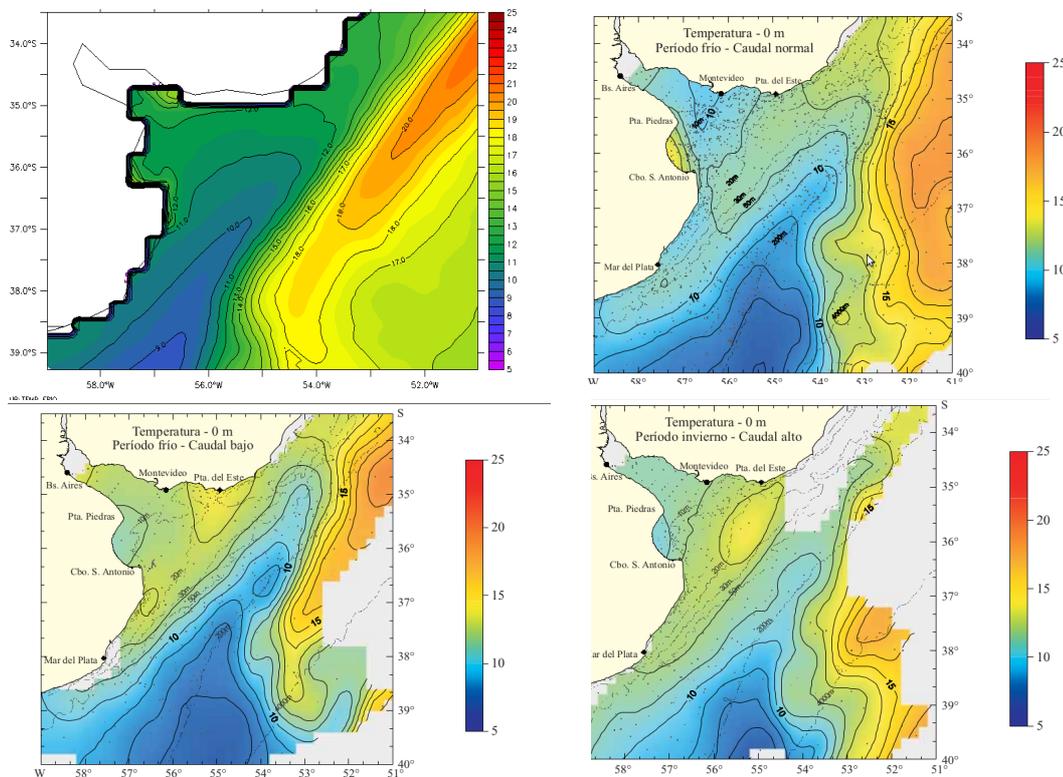


Figura 18: Comparación de la temperatura para el período frío en superficie entre ROMS, y el atlas para caudal normal, caudal bajo y caudal alto.

2.3.7.2 Temperatura superficial Período cálido

El patrón generado por el modelo es similar al atlas, con mayores temperaturas dentro del Río de la Plata (RdIP) y sobre el quiebre de plataforma y talud (Figura 19). El modelo no muestra temperaturas menores a los $\sim 15^{\circ}\text{C}$, mientras que el atlas sí lo hace e incluso pueden ser algo menores al sur de la región. Sucede lo mismo con las temperaturas máximas, donde en ROMS alcanza los $\sim 23^{\circ}\text{C}$ mientras que el atlas muestra máximos de 20°C . La lengua de agua fría proveniente del sur de la región puede observarse en las tres configuraciones del atlas y en el modelo, sin embargo en éste último la misma parece estar

“apretada” contra la plataforma (al W de $\sim 54.5^{\circ}\text{W}$) al igual de lo que sucede en el período frío, cuando en el atlas la lengua se extiende más hacia el este.

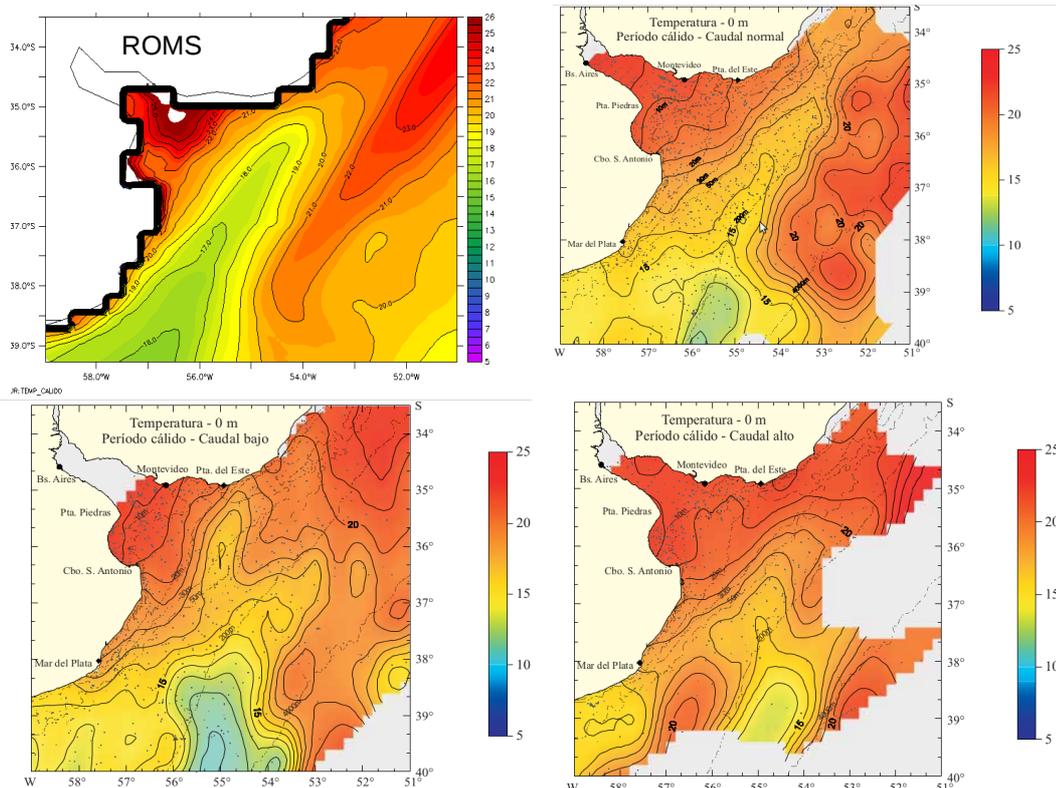


Figura 19: Comparación de la temperatura para el período cálido en superficie entre ROMS, el atlas para caudal normal, caudal bajo y caudal alto.

2.3.7.3 Salinidad superficial período frío

La salinidad en el RdIP parece estar bien representada (Figura 20). Puede observarse un ascenso gradual de la salinidad a partir del RdIP y de la costa desde salinidades iguales o menores a 20 en la boca del estuario a una salinidad típica de océano abierto sobre el quiebre de plataforma. El gradiente de las isohalinas es muy similar en todas las figuras y fue bien

representado por el modelo. Al igual que para la temperatura en éste período las isohalinas son paralelas a la costa. En el atlas la salinidad máxima, y que define el alcance de la pluma del RdIP (S~33.5) llega hasta la latitud de Mar del Plata (~38 °S), mientras que la salida del modelo genera valores menores sobre la costa hasta latitudes mayores. En líneas generales las figuras del modelo y el atlas son muy similares, aunque el atlas muestra variaciones de salinidad en escalas espaciales muy pequeñas particularmente fuera de la plataforma que podrían estar asociadas a la baja densidad de datos en esa región.

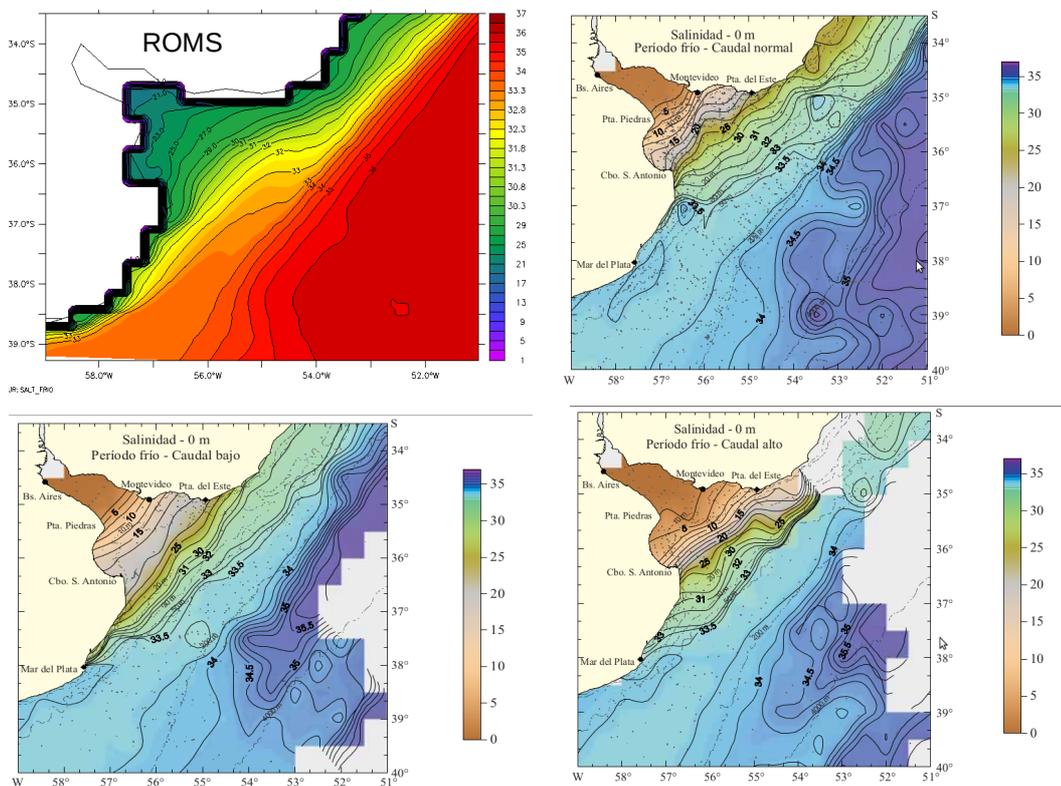


Figura 20: Comparación de la salinidad para el período frío en superficie entre ROMS, el atlas para caudal normal, caudal bajo y caudal alto.

2.3.7.4 Salinidad superficial período cálido

Aquí destaca la buena representatividad del modelo dentro del estuario, mostrando salinidades iguales o menores a 10 en la boca y también se observa el gradiente en aumento a medida que nos alejamos de la costa (Figura 21). La pluma se observa más extendida hacia el E al igual que en el atlas, lo que genera que las aguas menos salobres se extiendan al E sobre la plataforma continental. Al igual que en el período frío la salinidad menor o igual a 34.5 se extiende más allá de Mar del Plata (~38°S). Al sur de 38°S en el atlas la salinidad es bastante homogénea y >34 sobre la plataforma. En el modelo aparece una “lengua” de relativa baja salinidad que entra hasta ~39°S, centrada en 55°W (borde del talud).

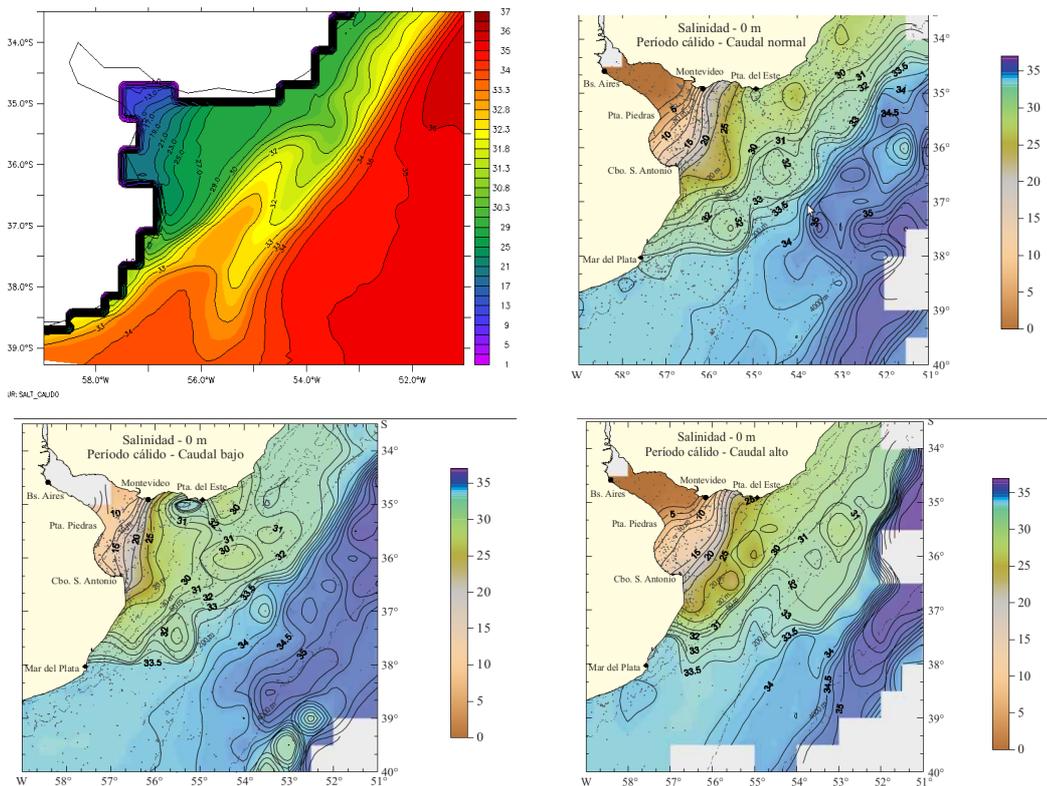


Figura 21: Comparación de la salinidad para el período cálido en superficie entre ROMS, el atlas para caudal normal, caudal bajo y caudal alto.

2.3.7.5 Temperatura período frío 50 m

A 50 m de profundidad el efecto de la descarga continental de agua dulce puede despreciarse y la intensidad del caudal no es relevante (Guerrero et al., 2010). También es una profundidad adecuada para observar la distribución horizontal y extensión del STSF, aunque la región no sea la más adecuada para esto. En general se observa un patrón similar entre ROMS y el atlas con las diferencias que se vienen observando en las figuras de superficie, *i.e.* el “estrechamiento” de la lengua fría hacia la costa, temperaturas más altas al norte de la región y el enfriamiento de las aguas al E de la CB en el océano abierto (Figura 22).

Es posible identificar tanto en el modelo como en el atlas un frente, que podría decirse que es el STSF en su extensión sur. Éste tiene una ubicación más al W y con un gradiente más estrecho en el modelo. El gradiente del STSF en el modelo de 10°C a 16°C (transición entre SASW y STSW) ocurre en una banda estrecha entre los ~56°W y los 55°W, mientras que en el atlas éste patrón es observado más al E entre los ~54°W y 52°W, aunque en éste último la falta de datos del lado costero no lo hacen tan notorio. Este patrón cambia al norte de ~35°S donde el frente en el modelo y el atlas coinciden mejor en la ubicación geográfica sobre la plataforma (~53°W). En el modelo la isoterma de 11°C no supera los 36°S curvándose hacia la costa, mientras que en el atlas alcanza los 35°S curvándose progresivamente (Figura 22).

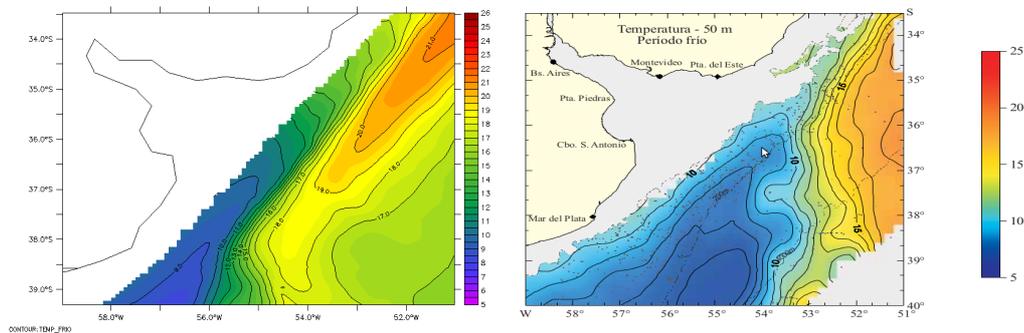


Figura 22: Comparación de la temperatura para el período frío en 50 m de profundidad entre ROMS y el atlas.

2.3.7.6 Temperatura período cálido 50 m

Se observa nuevamente a la lengua fría al sur de la región apretada contra la costa. El STSF a $\sim 36^\circ\text{S}$ comienza a salir de la plataforma como puede observarse en la figura del atlas, mientras que en la salida de ROMS parece ocurrir muy cerca de la separación de la CB de la plataforma en los $\sim 38^\circ\text{S}$ (Figura 23). A su vez la salida del modelo genera un gradiente menos intenso que el observado en el atlas para el frente. En la parte norte de la figura del atlas puede verse cómo el frente parece continuar más allá del límite norte (Figura 23). Al contrario en el modelo las isothermas se curvan hasta aproximadamente $\sim 34^\circ\text{S}$. Parece que el patrón se encuentra desplazado al sur en el modelo.

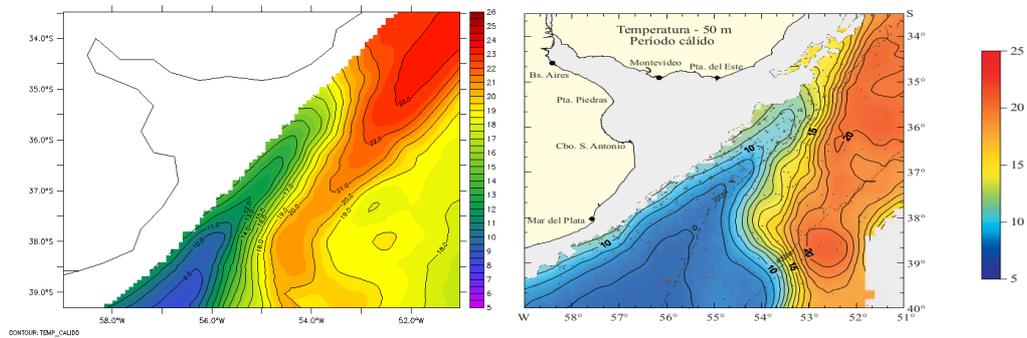


Figura 23: Comparación de la temperatura para el período cálido en 50 m de profundidad entre ROMS y el atlas.

2.3.7.7 Salinidad período frío 50 m

Las figuras muestran valores similares de salinidad entre ellas, pero nuevamente sucede lo mismo que pasaba con la temperatura. Es decir, el frente no se separa de la plataforma hasta $\sim 38^{\circ}\text{S}$, aunque aquí sí se observa como el frente continúa al norte más allá de lo que la región abarca (y sobre la plataforma continental) (Figura 24).

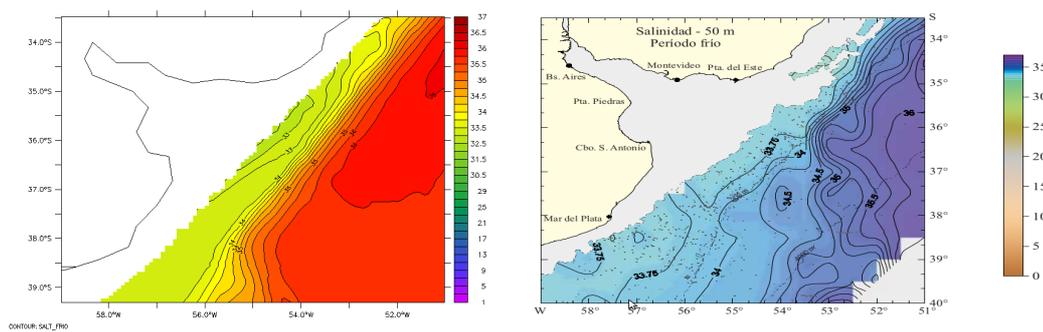


Figura 24: Comparación de la salinidad para el período frío en 50 m de profundidad entre ROMS y el atlas.

2.3.7.8 Salinidad período cálido 50 m

Los valores de salinidad de la salida del modelo son muy similares a los del atlas (Figura 25). Se pueden identificar dos patrones distintos separados por la latitud: al norte de $\sim 37^{\circ}\text{S}$ el patrón es muy similar con el frente sobre la plataforma, aunque un poco más al sur en el modelo que en el atlas, y al sur de $\sim 37^{\circ}\text{S}$ en el modelo el frente debería haberse separado de la plataforma continental, sin embargo sigue paralelo a la costa hasta $\sim 38^{\circ}\text{S}$ donde comienza a separarse.

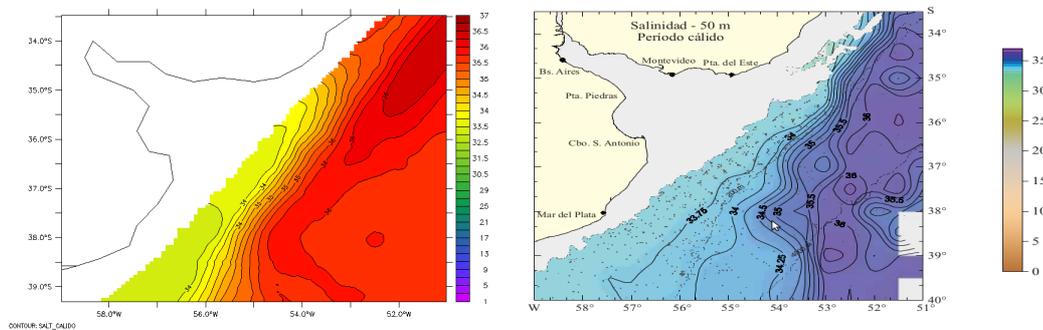


Figura 25: Comparación de la salinidad para el período cálido en 50 m de profundidad entre ROMS y el atlas.

2.3.8 Caracterización del STSF

Tomando en cuenta los artículos que describen el Frente Subtropical de Plataforma (Piola et. al., 2000, 2008), se grafican los campos de temperatura y salinidad intentando emular los cortes realizados en dichas publicaciones, que fueron hechas a partir de datos de campañas oceanográficas y fueron utilizados para validar la habilidad del modelo en representar dicho frente. Como hemos visto en la sección anterior en los campos horizontales, el STSF es evidente a partir de los 50 m de

profundidad hasta que nos alejamos de la plataforma. Aquí se muestran los cortes paralelos a la costa a diferentes distancias de la misma, los que llamaremos transectas (Figura 26). Primero se graficaron los campos medios anuales, se analizó en cuál de las transectas el frente estaba más pronunciado o “identificable” y se eligió la que mejor representó el frente. Luego, se graficaron campos estacionales usando la transecta elegida. Además se tomó un mes particular representativo del invierno y verano para que sea más comparable a los datos en las publicaciones provenientes de campañas puntuales.

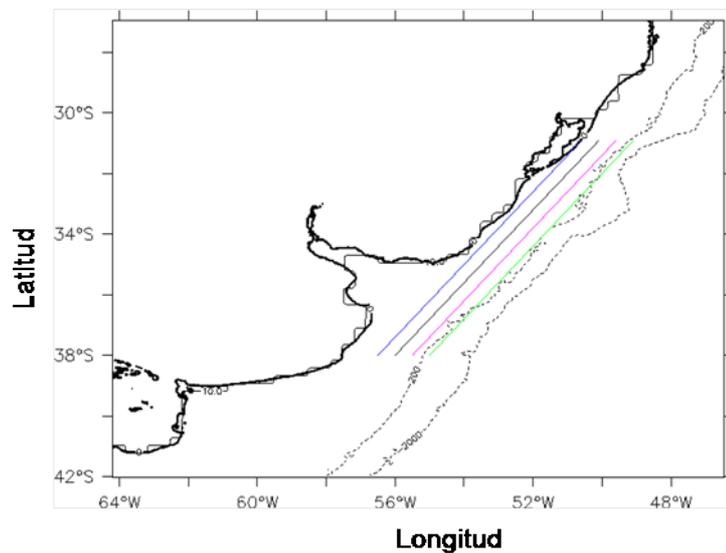


Figura 26: Ubicación de las transectas sobre las cuales se grafican los cortes para caracterizar el STSF. Las mismas están graficadas sobre el campo de salinidad media. Se consideran 4 transectas, que nombraremos del 1 al 4 empezando por la más cercana a la costa. En la figura: 1 = azul, 2 = negro, 3 = violeta y 4 = verde).

En la figura 27 puede observarse en los perfiles en profundidad que para la temperatura existe un frente que está presente en todas las transectas, siendo más evidente en las de profundidades intermedias (2 y la 3), y menos en la más externa o más profunda (4). El máximo gradiente de temperatura (12°C) se observa en la transecta 2 (10°C a 22°C desde el

comienzo al fin de la transecta) (Figura 27).

En cuanto a los cortes para la salinidad media, es evidente la aparición de aguas diluidas en superficie en las transectas más costeras (1, 2 y 3) a causa de la mayor influencia de la descarga del RdIP. La transecta 4 parece estar ubicada más alejada de una fuerte influencia de aguas diluidas. Es en las transectas 2 y 3 en las que se puede observar un mayor gradiente de dicha variable y en las cuales puede identificarse un STSF (Figura 28). De todas formas el frente es más evidente en el campo de temperatura que en salinidad.

En vista de esto se seleccionó la transecta 2 para estudiar la variación estacional del STSF en la vertical. En general se pudo observar el STSF en las cuatro estaciones del año. Más claro y marcado para la temperatura, pero también presente en la salinidad (Figuras 29 y 30). A su vez se puede ver la variación estacional descrita anteriormente para las variables, predominando las temperaturas más cálidas y una menor influencia de la salinidad hacia el norte en verano, y temperaturas más frías con mayor influencia de aguas diluidas al norte de la región para el invierno (Figura 29).

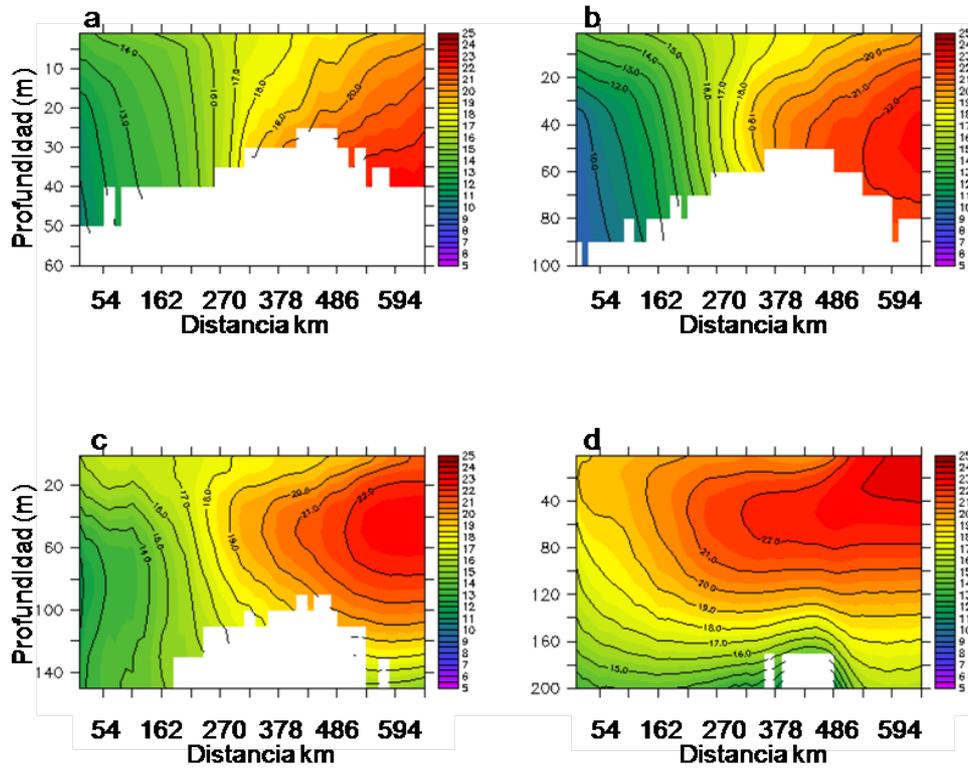


Figura 27: Cortes paralelos a la costa del campo de temperatura media (°C) resuelta por ROMS para la transecta 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4(d).

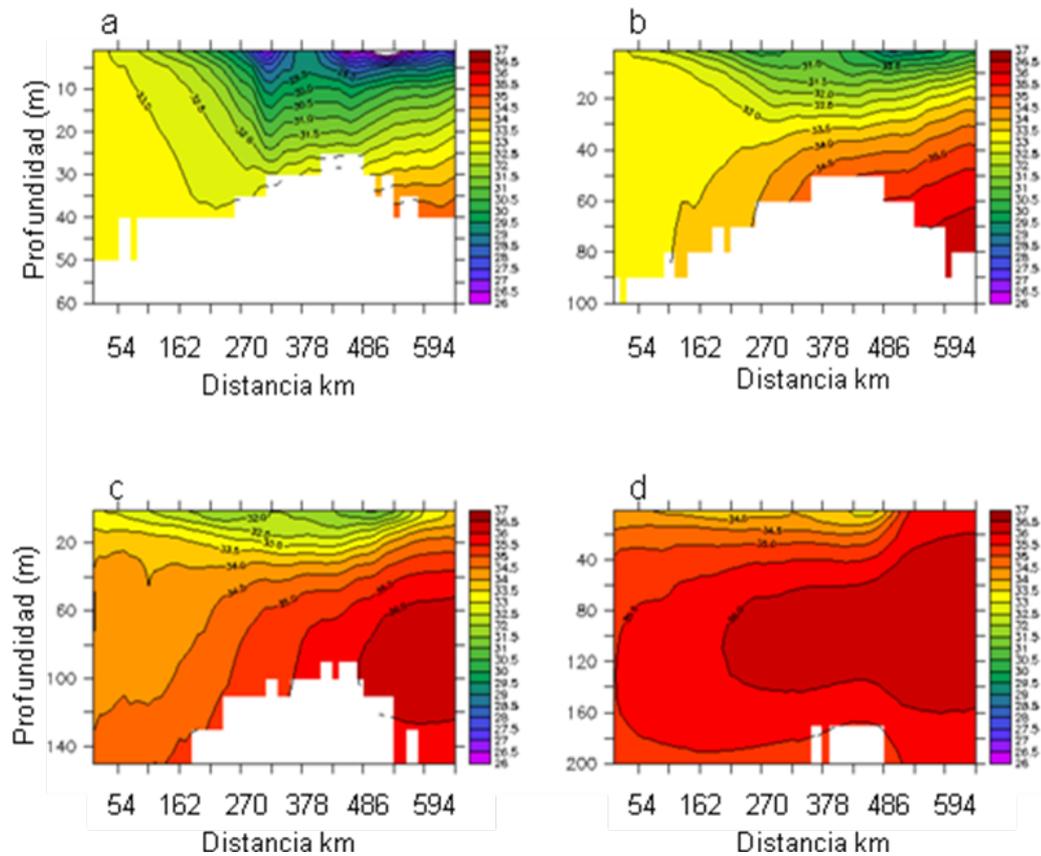


Figura 28: Cortes paralelos a la costa del campo de salinidad media resuelta por ROMS para la transecta 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4(d).

En verano el gradiente de temperatura de 14°C a 22°C es de 0,06 °C.km-1 (ídem Piola et. al., 2000 – 6°C.100km), siendo ésta la estación de gradiente más estrecho. Durante el invierno dicho gradiente es de 0,03 °C.km-1. Si bien las temperaturas y salinidades cambian de estación en estación el frente parece ser bastante estable en su ubicación sobre la plataforma, mostrando una pequeña variación estacional N-S en su ubicación. Es interesante observar que si bien existen profundidades en las cuales el frente es más fuerte o más notorio, en general tiende a ocupar toda la columna de agua por debajo de la capa de mezcla superficial. En el campo de salinidad se puede ver cómo el frente es

cubierto por una capa de baja salinidad casi permanente todo el año, siendo la misma más intensa y profunda durante el invierno y la primavera, y menos durante el verano y el otoño (Figura 31).

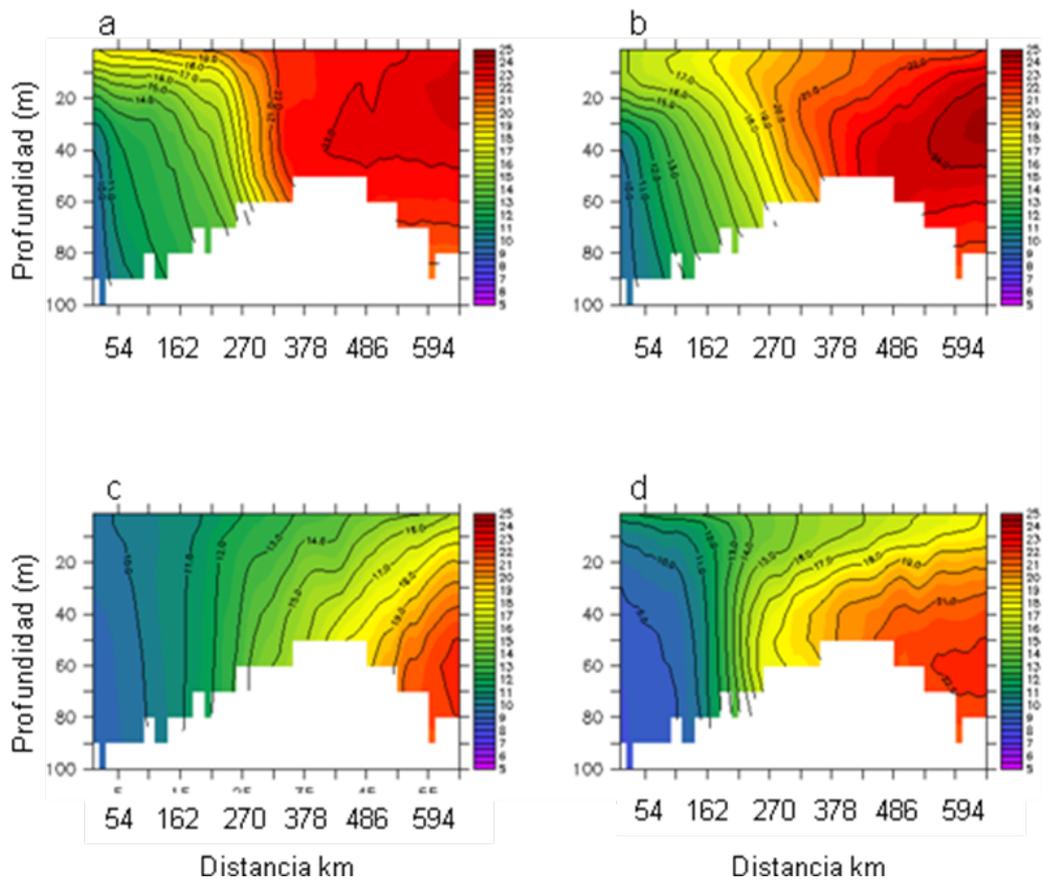


Figura 29: Corte paralelo a la costa correspondiente a la transecta 2 para la temperatura estacional (°C). Verano (a), Otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

La comparación de estos campos climatológicos del modelo con datos observados in-situ es difícil porque generalmente los datos de campañas oceanográficas tienen una escala temporal distinta ya que corresponden al momento del muestreo. Es decir, no representan un campo medio, sino que es una muestra puntual para un tiempo dado.

Teniendo esas consideraciones en mente, se compara el análisis

realizado en Piola et al. (2000) a partir del resumen de datos hidrográficos del Centro Argentino de Datos Oceanográficos (CEADO) entre 20°-40°S.

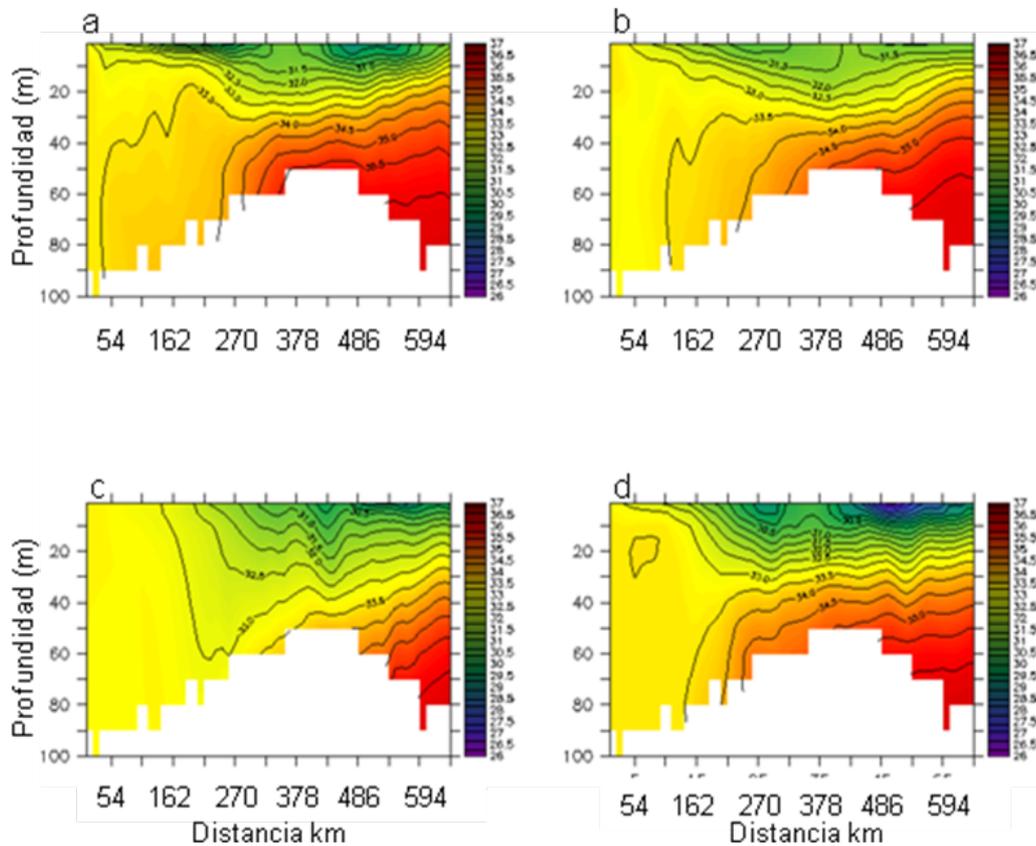


Figura 30: Corte paralelo a la costa correspondiente a la transecta 2 para la salinidad estacional. Verano (a), Otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

(Figura 31) con las salidas de ROMS. La figura 32 compara cortes observados con simulados. La comparación entre campos sinópticos y el modelo climatológico revela que la estructura espacial y los valores asociados al STSF son similares. No obstante, los gradientes horizontales son mayores en los campos observados. En los datos oceanográficos se observa un estrecho y fuerte gradiente en temperatura y salinidad que son coincidentes en su ubicación geográfica. En ROMS puede observarse que existe un frente en temperatura y salinidad que coinciden

geográficamente en su ubicación por debajo de los 30 m de profundidad. El gradiente de temperatura resuelto por ROMS es más estrecho entre los 16°C-22°C a una profundidad de ~50 m y en salinidad a la misma profundidad está entre 33-35. Al igual que en los datos de la campaña en ROMS no se observa un frente en el campo de densidad sobre los frentes de temperatura y salinidad, dando cuenta de que el modelo representa la particularidad de que el frente está compensado en densidad (Piola et al., 2000). De todas formas en ROMS el campo de densidad parece estar controlado por la salinidad por lo menos durante el invierno como describe Piola et al. (2000). En estos cortes se puede observar claramente una termoclina invertida característica de la región de plataforma a causa del flujo de aguas diluidas provenientes del RdIP (Piola et al., 2000, 2008) (Figura 32 d, c). Finalmente, es importante resaltar que es posible encontrar en las salida de ROMS situaciones en las cuales los cortes de temperatura y salinidad muestran gradientes horizontales con valores similares a los observados.

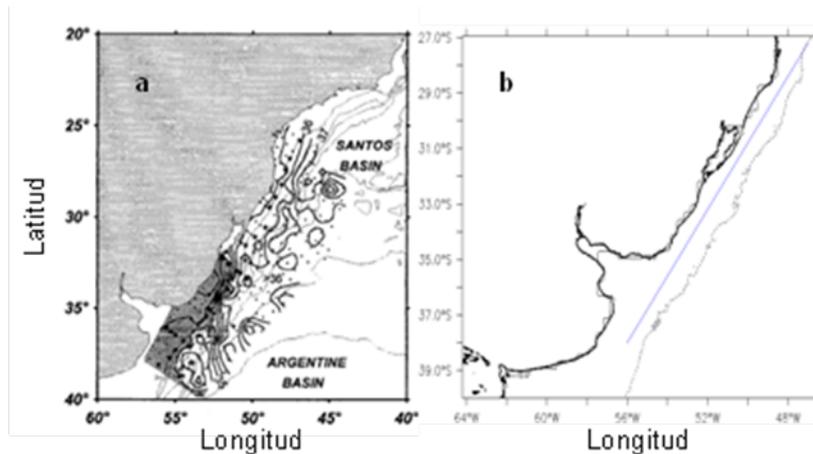


Figura 31: Región sobre la cual se trazó la transecta en la que se graficaron los cortes en Piola et al (2000) (a), y en ROMS (b).

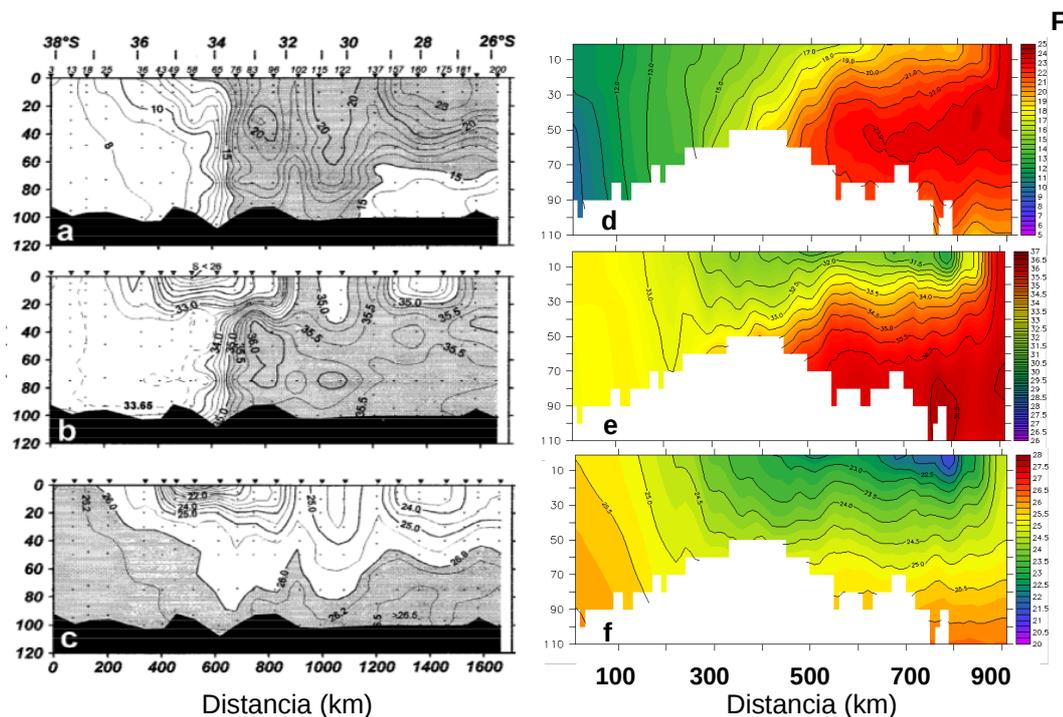


figura 32: Cortes a lo largo de las transectas sinóptico de junio en Piola et al (2000): temperatura (a), salinidad (b), densidad (c); y para el mes de junio en ROMS: temperatura (d), salinidad (e) y densidad (f).

2.4 Conclusión

Hemos visto a lo largo del capítulo que con la configuración utilizada para la simulación de la circulación oceánica sobre la plataforma continental del ASO, el modelo ROMS reprodujo de forma realista las principales características de la misma. Uno de los factores más importantes que representa el modelo es la ubicación geográfica de la CBM. Este es un aspecto muy importante dada la enorme influencia que tiene la CBM en el sistema de plataforma. En los campos de velocidad el modelo genera una CB muy definida y muy asociada al quiebre de plataforma (observado en las secciones de velocidad), con magnitudes y transportes con valores dentro del rango de variación observado de los mismos. A su vez, el

modelo da cuenta de la inversión estacional en la dirección de la velocidad (SW en verano, NE en invierno) sobre la plataforma continental.

Respecto a las variables de estado el modelo representa de forma realista los campos horizontales superficiales de las mismas. En cuanto a la salinidad, la dinámica de la pluma de descarga del Río de la Plata (sin haber añadido fuentes puntuales en la configuración) fue bien representada por el modelo. Se pudo observar la variación estacional en la salinidad del RdIP con valores coincidentes con los observados. La parte interna del Río de la Plata presentó generalmente valores más altos de salinidad que los reales, aunque en algunos momentos del año fueron bastante bajos (menores a 10). La estructura horizontal superficial de la temperatura fue también representada en buena forma por el modelo, en parte pues fue forzada con condiciones observadas en superficie. Pudimos observar la forma en la que el modelo captó la variación estacional de la temperatura y su semejanza tanto en magnitud como en ubicación geográfica con trabajos científicos de la zona.

Al comparar las salidas de ROMS con el Atlas Climatológico del Río de la Plata y su Frente Marítimo, se pudo observar con más detalle algunas diferencias entre los datos y el modelo, sobre todo un patrón repetido tanto en los campos de salinidad como de temperatura, representado por un desplazamiento hacia el W de las isohalinas e isotermas en la porción sur del dominio, quizás debido a la fuerte CB generada por ROMS. Esto sucede tanto en superficie como a 50 m de profundidad y para ambos períodos analizados (cálido y frío). Exceptuando esto último, la magnitud y estructura espacial de las variables fue coincidente con las del Atlas, tanto para los períodos fríos como cálidos. Asimismo pudo observarse la variabilidad estacional de la temperatura y la salinidad tanto en superficie como a 50 m y en éste último nivel lo que podría ser el STSF.

Respecto a la forma en la cual ROMS representó el STSF, observamos los campos sinópticos observados y el climatológico de ROMS mostraron una estructura espacial y valores asociados al STSF similares. En el modelo pudo observarse que existe un frente tanto en temperatura como en salinidad y estos coinciden geográficamente en su ubicación por debajo de la capa superficial. Si bien los valores de temperatura y salinidad cambian de estación en estación el frente parece ser bastante estable en su ubicación sobre la plataforma, mostrando una pequeña variación estacional N-S en su ubicación. A su vez, es importante resaltar que si bien en la climatología el gradiente de temperatura y salinidad es menor a los cortes observados, es posible encontrar en la simulación situaciones en las cuales los cortes de estas variables muestran gradientes horizontales con valores similares a los observados sinópticamente.

A través de este análisis hemos concluido que, tanto la configuración como el resultado de las simulaciones realizadas por ROMS representaron en forma realista los patrones hidrográficos principales de la región. En particular al Frente Subtropical de Plataforma y su variación. A su vez es durante la estación de invierno donde la ubicación del STSF y el desove de la anchoita son más coincidentes geográficamente.

CAPÍTULO III: EL ROL DEL STSF COMO POSIBLE BARRERA PARA HUEVOS Y LARVAS DE LA ANCHOITA

3.1 Introducción

3.1.1 Caso de estudio: La anchoita (*Engraulis anchoita*) en el ASO

Como describimos en la introducción general, la anchoita (Figura 33) constituye una especie muy bien representada en las muestras de ictiopláncton en la región afectada por el STSF (Muelbert et al., 2008). A su vez, es una de las especies pelágicas más abundantes de una extensa zona del ASO lo que la convierte en un importante componente del ecosistema marino. Tiene además el potencial de convertirse en una especie objetivo de la pesquería en la región ya que la misma se encuentra actualmente subexplotada y con una captura potencial enorme (Hansen, 2004). Diversos mecanismos se han propuesto para entender como la anchoita se ha adaptado a un ambiente tan variable y extenso cómo es la plataforma del ASO (Bakun & Parrish, 1991). Frentes como el STSF podrían jugar un rol en el cierre del ciclo reproductivo, actuando como una zona de retención o acumulación de sus huevos y larvas. En el siguiente capítulo exploraremos un posible efecto del STSF en un desove invernal de *E. anchoita*.



Figura 33: *Engraulis anchoita*. Foto tomada del INIDEP (<http://www.inidep.edu.ar/>).

3.1.2 Desove (zonas y período del año)

De su estrategia reproductiva se sabe que es un desovante múltiple que desova durante todo el año pero con distinta intensidad y ubicación geográfica según la época del año (Sánchez, 1990). Los picos máximos de desove sobre las plataformas continentales de Argentina y Uruguay ocurre entre los meses de octubre y enero, con variaciones latitudinales en los mismos, reconociéndose al menos dos grupos desovantes (Alheit et al., 1991). Más al norte, en la región sur de Brasil (desde Cabo Frío al Chuy) la especie desova todo el año, pero lo hace principalmente en dos zonas y en distinta época del año (Castello, 1990). Una de éstas, la más norteña, está asociada a la relativamente fría Agua Central del Atlántico Sur (ACAS) que surge frente a Cabo Frío (~22°S) durante los meses de verano en el sudeste debido a un evento de surgencia muy bien documentado (Méndez de Castro et al., 2006). La otra se ubica más al sur sobre la región nerítica durante los meses de invierno (Alheit et al., 1991). A continuación se presenta la información de zonas de desove de la especie por estación del año e información de zonas de cría y distribución de las larvas discriminada por país.

Invierno: Sobre la plataforma argentina y uruguayana Ciechowski & Sánchez (1986) registran dos centros de actividad reproductiva que ocupan un área total de ~26385 mn² (mn = millas náuticas) y que tienden a estar separados (Sánchez, 1990). Dentro de éstos las mayores densidades se encuentran al norte de 36°S donde puede observarse actividad reproductiva tanto en la plataforma como sobre el talud continental, encontrándose los valores más altos de densidad de huevos en aguas uruguayas (~34.5°S) en una columna de agua de 180 m de profundidad y temperaturas de 12,5°C. A su vez, en ~35°S, 35 m de profundidad y 11°C encontraron el mayor porcentaje de huevos de todo el

centro de desove norte. El segundo centro invernal descrito es más al sur entre 38°S – 41°S y está delimitado por la isobata de 50 m (Ciechomski & Sánchez, 1986). Ambos centros tienden a estar separados. Al sur del RdIP el desove invernal parece encontrarse en un rango temperatura de ~11°/~14°C, habiendo registrado como temperatura mínima los 9°C (Ciechomski, 1967, 1968). Durante el invierno la extensión geográfica total del desove sobre suele estar en su mínimo, sin embargo, pueden encontrarse huevos y larvas hasta ~23°S sobre toda la plataforma sur de Brasil (Castello, 1990; Bakun & Parrish, 1991). Así, al sur de Brasil durante el invierno suelen llegar adultos desovantes con las aguas frías advectadas desde la región sur y por tanto pueden encontrarse huevos y larvas sobre la plataforma continental sur (Acuña & Castello, 1986, Lima & Castello, 1995). De acuerdo a un análisis espacial de la distribución de tallas de las larvas que nacen en la región sur de Brasil se infiere que las mismas son transportadas al norte por la rama costera de la CM y mantenidos en la plataforma por un transporte de Ekman dirigido hacia la costa durante este período (Lima & Castello, 1995). Durante esta estación del año se ha encontrado que las larvas de anchoita muestran un mayor éxito alimenticio que en otras estaciones del año, aparentemente aprovechando el efecto combinado de la descarga de agua dulce del RdIP y la llegada de aguas frías desde el sur (Vasconcellos et. al., 1998).

Otoño: El desove se reduce bastante durante el otoño, sin embargo puede observarse una progresión del desove hacia el norte a partir de abril (Sánchez, 1990) y encontrarse huevos y larvas frente a San Pablo (23°S-27°S) en mayo, en los alrededores de Río Grande (29-34°S) en abril y concentraciones relativamente altas frente a Uruguay y el norte de Argentina (34°S-38°S) (Castello, 1990; Bakun & Parrish, 1991 y referencias). Durante esta estación del año no se registra desove al sur de 41°S (Sánchez, 1990).

Primavera: En aguas uruguayas y argentinas pueden encontrarse al menos dos grupos desovantes, uno norteño que no supera los 41°S y otro más al sur entre 41°S – 47°S (Sánchez, 1990). Durante la primavera huevos y larvas pueden ser abundantes hasta los 23°S (sobre toda la plataforma sur brasileña). Si bien las mayores concentraciones se encuentran entre 29°S-41°S, el desove puede extenderse hasta 44°S donde puede existir algún pico de desove (Bakun & Parrish, 1991). El desove en el norte brasileño (Cabo Frío) está muy relacionado con la surgencia y entrada del ACAS sobre la plataforma y zona costera que ocurre en estas fechas (Castello, 1990). En setiembre el 80% del desove tiene lugar al norte de ~36°S, con un único centro intenso cerca de la costa uruguaya en ~34.5°S, aunque también se registra en menor abundancia frente a El Rincón (~39°S) (Sánchez, 1990). Para los meses de octubre y noviembre el desove se esparce hacia el sur y cubre el norte patagónico. En aguas uruguayas y durante fines de primavera se registran las mayores densidades de huevos en la capa de mezcla superior (0-20 m), pero en algunas estaciones de muestreo se ha encontrado grandes densidades debajo de la termoclina (21-30 m) (Alheit et al. 1991) y en algunas zonas influenciadas por la descarga del RdIP (Sánchez, 1990). Es posible encontrar larvas también en capas superficiales, aunque en las estaciones más offshore se registraron a profundidades entre 21-41 m (Alheit et al., 1991). En la transición de primavera/verano durante los meses de noviembre y diciembre en aguas de la plataforma uruguaya los huevos y larvas de anchoita constituyen una parte muy importante de las muestras de ictioplancton (Alheit et al., 1991).

Verano: En el verano el desove se encuentra en su máxima extensión geográfica, desde Cabo Frío (23°S) hasta Mar del Plata (~40°S), sin embargo las concentraciones de huevos y larvas son menores que

durante la primavera (Bakun & Parrish, 1991). El máximo de concentración está entre 41°S-47°S sobre aguas argentinas (Sánchez, 1989). En diciembre el desove alcanza el Golfo de San Jorge, el extremo sur reportado para la especie (47°S), y se esparce a medida que avanza el verano sobre la plataforma continental y el quiebre (Sánchez, 1990). El desove en el norte brasileño (Cabo Frío) está al igual que en la primavera muy relacionado con la surgencia que ocurren en estas fechas (Castello, 1990).

Para poder visualizar mejor la variabilidad espacial de los principales centros de desove de la anchoita, se puede encontrar un buen resumen de las zonas de desove en el trabajo de Bakun & Parrish (1991) y del cual se extrajo una figura que ilustra lo dicho anteriormente (Figura 34).

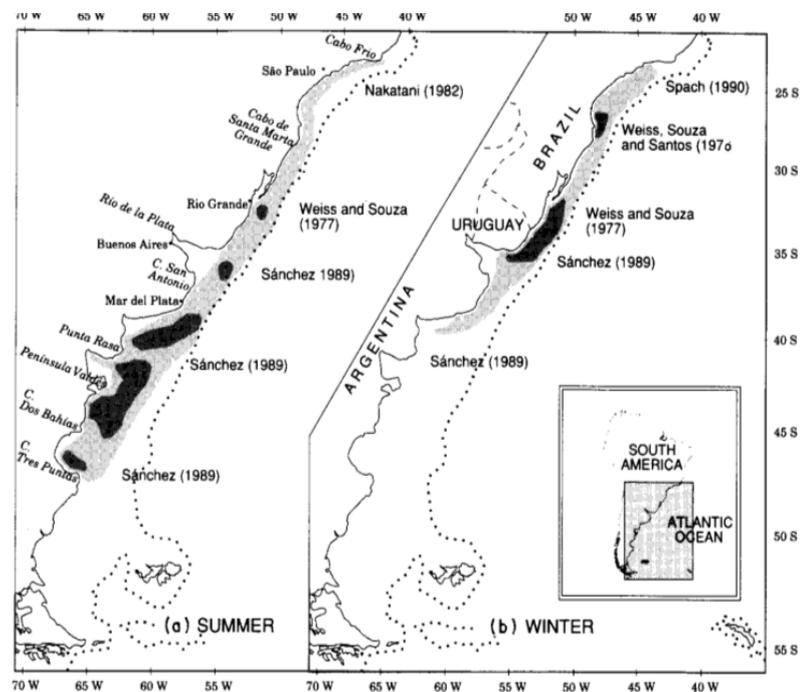


Figura 34: Esquema de las principales zonas de desove de *Engraulis anchoita* durante verano e invierno en el ASO. Figura tomada de Bakun & Parrish (1991).

3.1.3 Zonas de cría y distribución de larvas según la región

Argentina: Las larvas en post-flexión (o sea, ya con capacidad de nado) nacidas en primavera y principio del verano frente a la provincia de Buenos Aires son retenidas allí mismo, con un cambio latitudinal en la frecuencia de tallas durante toda la estación y en acuerdo con el avance y retiro de aguas cálidas sobre la plataforma continental (Sánchez, 1990). En marzo larvas más grandes pueden encontrarse sólo en la parte norte de la provincia, mientras que al sur de 39°S se colectan únicamente larvas recién nacidas (Sánchez, 1990). Al sur de 41°S la ocurrencia de huevos y larvas está asociado a sistemas frontales (principalmente el frente mareal) aunque larvas grandes y juveniles son retenidos en la zona incluso una vez que el frente ha desaparecido (fines de verano) (Sánchez, 1990). También pueden encontrarse larvas desde abril a julio, de menor tamaño en abril y mayo (Largo total LT ~10 mm), y mayor en junio y julio (LT ~20 mm) (Sánchez, 1990). Parte de las larvas nacidas en otoño-invierno parecen ser arrastradas a latitudes más bajas favorecido por la mayor incidencia e intensidad de aguas subantárticas y la descarga del RdIP. La presencia de individuos post-metamórficos (juveniles) en octubre y noviembre en zonas poco profundas de El Rincón podría indicar un grupo individual de desove invernal al sur de 38°S (Sánchez, 1990).

Uruguay: La información de distribución de las larvas en la plataforma uruguaya es escasa. Durante el verano y el otoño, pueden encontrarse juveniles desde la costa hasta 50 millas mar adentro, estando los más pequeños en aguas más costeras y los de mayor talla más afuera (Pin, 1990 y refs. Alheit et al 1991).

Brasil: Todas las zonas costeras de la plataforma continental sur brasileña pueden servir como área de cría para la anchoita, incluso pueden

extenderse hacia el este pero siempre sobre la plataforma continental (Castello, 1990).

En un estudio sobre la distribución vertical de huevos y larvas de la anchoita y su relación con los mecanismos físicos que la controlan Alheit et al. (1991) encuentran que la sobrevivencia de las larvas parece favorecerse por una combinación de diferentes procesos a lo largo de la región: (1) retención larval, estratificación y procesos de surgencia en aguas brasileñas; (2) advección hacia la costa y la descarga del Río de la Plata en aguas uruguayas; y (3) retención larval y mezcla mareal en aguas argentinas. El hecho de que la anchoita desove durante todo el año en una región extensa de la plataforma continental de ASO hace que los huevos y larvas de la misma se enfrenten a un conjunto de diferentes escenarios ambientales dependiendo de la zona donde es desovado y de la época del año. Estos trabajos discuten el hecho de que a lo largo del tiempo la especie se haya adaptado a diversas estrategias de desove en respuesta a los distintos escenarios físicos y biológicos, y por tanto la variabilidad en el reclutamiento de la especie no puede explicarse por una sola hipótesis (Alheit et al., 1991). La enorme versatilidad demostrada por las especies de la familia *Engraulidae* para reproducirse y sobrevivir en las diversas regiones donde habitan puede ser la principal razón de su éxito alrededor del mundo (Bakun & Parrish, 1991). Por tanto el estudio de los procesos físicos que afectan a las primeras etapas del ciclo de vida de la anchoita tiene un papel fundamental para poder comprender dicha versatilidad y aprovechamiento de procesos oceanográficos para completar su ciclo de vida.

Es así que en éste capítulo utilizando el enfoque de los Modelos Basados en Individuos (Ichthyop) estudiaremos como un proceso oceanográfico conocido sobre la plataforma del ASO como el STSF puede estar

actuando sobre las etapas tempranas del ciclo de vida de la anchoita en un desove invernal.

3.2 Métodos

3.2.1 El Ichthyop

El Ichthyop es un Modelo Basado en Individuos (MBI) desarrollado para estudiar cómo los factores físicos (e.g. corrientes oceánicas, temperatura, salinidad) y biológicos (e.g. crecimiento, mortandad) afectan la dinámica del ictioplancton (Lett et al., 2008). Los MBI comprenden a los individuos y su ambiente físico. En el Ichthyop los individuos están caracterizados por las variables de estado: edad (días), talla (mm), estado (huevo, larva vitelina o alimenticia), locación (longitud (°E), latitud (°N) y profundidad (m)) y estatus (viva o muerta). El ambiente físico está caracterizado por las variables de estado oceánicas: velocidad de corrientes ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperatura (°C) y salinidad.

La herramienta utiliza las series temporales de los campos tridimensionales de velocidad, temperatura y salinidad generados a partir de las simulaciones oceánicas de ROMS (aunque puede utilizar las de otros modelos) para simular el transporte lagrangiano de partículas o ictioplancton. Una descripción detallada del funcionamiento y utilidades del Ichthyop se encuentra en Lett et al. (2008). Es una herramienta de descarga gratuita programada en lenguaje JAVA y que contiene algunos submodelos (desove, movimiento, crecimiento, mortandad, reclutamiento) que permiten generar las características biológicas de la especie de interés. Como resultado de la simulación se generan archivos de posición de las partículas según los parámetros de entrada y la evolución de otras

características biológicas según se hayan especificado.

Se utilizó el enfoque de los MBIs para investigar el probable rol del Frente Subtropical de Plataforma en la advección/retención de huevos y larvas de la especie *Engraulis anchoita*. En particular, para testear la hipótesis de si éste puede actuar como una “barrera” para los huevos y larvas de la anchoita que son desovados al suroeste y/o noreste del frente mismo. Además, podremos evaluar cual será el destino de los huevos desovados frente al Río de la Plata. Se simularon los movimientos horizontales que serán debidos exclusivamente a los campos generados por ROMS, y los verticales que dependen además de la velocidad vertical y la densidad del agua, de la densidad impuesta a las partículas.

3.2.2 Configuración

3.2.2.1 Dominio espacial

El dominio espacial sobre el cual se liberaron las partículas fue el mismo que el utilizado para la grilla hija de ROMS con una resolución espacial horizontal de $1/12^\circ$ y 32 niveles verticales.

En el capítulo I a través de la validación de ROMS se pudo concluir que el mismo representa en forma realista los patrones climatológicos de la región de estudio para poder usarlo como entrada a Ichthyop (Lett et al., 2008).

3.2.2.2 Período, duración temporal y crecimiento

En la validación se pudo observar que el STSF fue bien simulado tanto geográficamente como en magnitud por el modelo, en particular durante los meses de invierno (descrito en la sección 2.3.8). A su vez, como se mencionó anteriormente, la anchoita suele desovar intensamente en la plataforma continental del sur de Brasil durante el invierno austral. Por estas dos razones principales, se decidió realizar los experimentos dentro de dicha estación del año.

En nuestro estudio se quiere simular la etapa en la cual los huevos y larvas de la anchoita prácticamente no poseen capacidad de movimiento, es decir, que serán parte del ictioplancton durante todo el período de simulación. De esta forma podremos decir que los movimientos de las partículas se debieron exclusivamente al movimiento del agua circundante y a la densidad de las mismas. Debido a esto, la elección del tiempo de simulación debería ser menor a aquel en el cual la talla de las larvas de la especie objetivo adquiere modificaciones morfológicas que la ayudan a ubicarse en la columna de agua y obtener cierta capacidad de movimiento. Estos cambios morfológicos son muy importantes en el desarrollo y estilo de vida de las larvas, ayudan a las mismas a mejorar la capacidad de conseguir alimento, a ubicarse en zonas de mejores condiciones en la columna de agua, evitar predadores, etc. Los principales cambios que ocurren en la etapa larval de la anchoita son: aparición de la vejiga natatoria, aletas funcionales y las branquiespinas (Phonlor, 1984). Se ha establecido que a partir de los 10 mm de longitud total es cuando estos cambios ya comenzaron o bien pueden estar completos (Vasconcellos et al., 1998; Castello, 2007), y por lo tanto podemos tomar este período como el “período puramente planctónico” de la larva. Esto quiere decir que simulamos el transporte hasta que las

larvas alcanzaron la talla indicada (10 mm).

En el Ichthyop existe un submódulo de crecimiento de las partículas. Sin embargo, el mismo no fue utilizado en estos experimentos pues en nuestro caso no resulta relevante conocer qué sucede con las larvas en función de su edad durante el experimento sino simular el transporte de las mismas hasta que las larvas alcancen los 10 mm. Para esto se decidió calcular el crecimiento retrospectivo de las larvas y así poder estimar el tiempo necesario para que las mismas alcancen los 10 mm. Se sabe que la eclosión de los huevos es dependiente de la temperatura según la ecuación (ec. 1) (Ciechomsky & Sanchez, 1984):

$$\log Y = 2.449 - 0.042X \quad (1)$$

, donde Y es la edad de eclosión en días y X es la temperatura en °C.

Por tanto, aquellos que se encuentren al momento de la puesta en aguas más cálidas eclosionarán más rápido y los que estén sobre aguas más frías lo harán más lentamente. Como hemos visto, en la región de estudio existe un fuerte gradiente térmico entre las regiones norte y sur del dominio analizado, por lo que se calculó el tiempo que le llevaría eclosionar a los huevos durante el invierno si nacieran al sur o al norte de la región. Así, se tomaron dos regiones: una cálida entre -33°S:-31°S/-52°W:-50,75°W, de temperatura promedio 15,5 °C, y otra fría entre -35°S:-36,2°S/-54,5°W:-55,5°W de temperatura promedio 11,0 °C. Se obtuvo que en la zona cálida la eclosión se da en 2,6 días, mientras que en la zona fría la eclosión se da a los 4,0 días.

Ahora bien, una vez que la larva eclosiona comienza a crecer en forma distinta. Leonarduzzi et al. (2010) encuentran que el crecimiento no es totalmente dependiente de la temperatura y que el mismo puede ajustarse

con una recta en los primeros días del crecimiento larval (incluyendo el rango de talla de interés, de 0 mm a 10 mm. Los autores además distinguen entre tres estaciones del año (otoño, primavera y verano), encontrando una ecuación para cada estación. Como en el trabajo de Leonarduzzi et al. (2010) no encontraron una ecuación para el invierno, en este trabajo elegimos la ecuación correspondiente al otoño, debido a que dicha estación presentaba una temperatura intermedia (ec. 2). Con esta ecuación se calculó el tiempo necesario para que las larvas de anchoita alcancen los 10 mm. A este valor se le sumó el tiempo de estadio de huevo dependiendo de si está en la zona fría (sur) o cálida (norte).

$$SL = 0,42t + 3,7 \quad (2)$$

Como resultado se encuentra que en la zona fría y cálida las larvas alcanzan los 10 mm de largo total a los 19 y 17 días, respectivamente. Como el experimento es dinámico y las larvas estarán expuestas a distintas condiciones de eclosión y para simplificar el análisis se decidió tomar un único tiempo de simulación de 19 días, tiempo suficiente para que las larvas que se encuentren en la zona fría alcancen la talla deseada para el análisis.

Dado que las simulaciones con el Ichthyop durarán 19 días, para tener representado el invierno austral usando las salidas de ROMS por un período de tres años, se decidió dividir el tiempo de simulación en tres fechas consecutivas e independientes para cada uno de los tres años analizados: del 15 de junio al 4 de julio (JN1, JN2 y JN3), del 5 de julio al 24 de julio (JL1, JL2 y JL3) y del 25 de julio al 14 de agosto (A1, A2 y A3). Esto da un total de tres eventos de desove consecutivos por año, o dicho de otra forma hubo un total de 9 experimentos (tres por año). Cada experimento o simulación representó un evento de desove simultáneo en

las zonas elegidas para el mismo. El paso de tiempo elegido para el Ichthyop fue de 3600 s (o sea 1 hora), y los archivos fueron almacenados cada 3 pasos de tiempo, dando un total de 153 tiempos para cada experimento.

Otro aspecto importante es la densidad de las partículas liberadas, ya que eso será un factor determinante de la posición de la misma en la columna de agua además de influir en los movimientos verticales de las partículas. Parada et al. (2003) en un estudio sobre los cambios en la densidad de los individuos liberados en la región de Benguela (África) para la especie de anchoa *Engraulis capensis*, concluyen que la densidad que mejor describe los patrones de transporte es $1,025 \text{ g.cm}^{-3}$. Debido a que en la revisión bibliográfica no fue posible encontrar una densidad para *E. anchoita*, se utilizó la densidad de $1,025 \text{ g.cm}^{-3}$ para nuestros experimentos.

3.2.3 El STSF y elección de Zonas de Liberación (ZIs)

3.2.3.1 El STSF: definición operacional

Antes de definir las zonas de liberación de las partículas para los experimentos, necesitamos una definición concreta de lo que será el frente durante el período del año a analizar con el fin de evaluar su probable efecto en el destino de las larvas, así como para poder definir las zonas de liberación de los huevos, y las zonas de reclutamiento.

En los cortes de las figuras 29, 30 del Capítulo II, se pudo observar que el modelo genera un frente en la plataforma en los campos climatológicos que va desde casi la superficie hasta el fondo. A su vez, el mismo fue más evidente en temperatura que en salinidad. Por esto para definirlo se

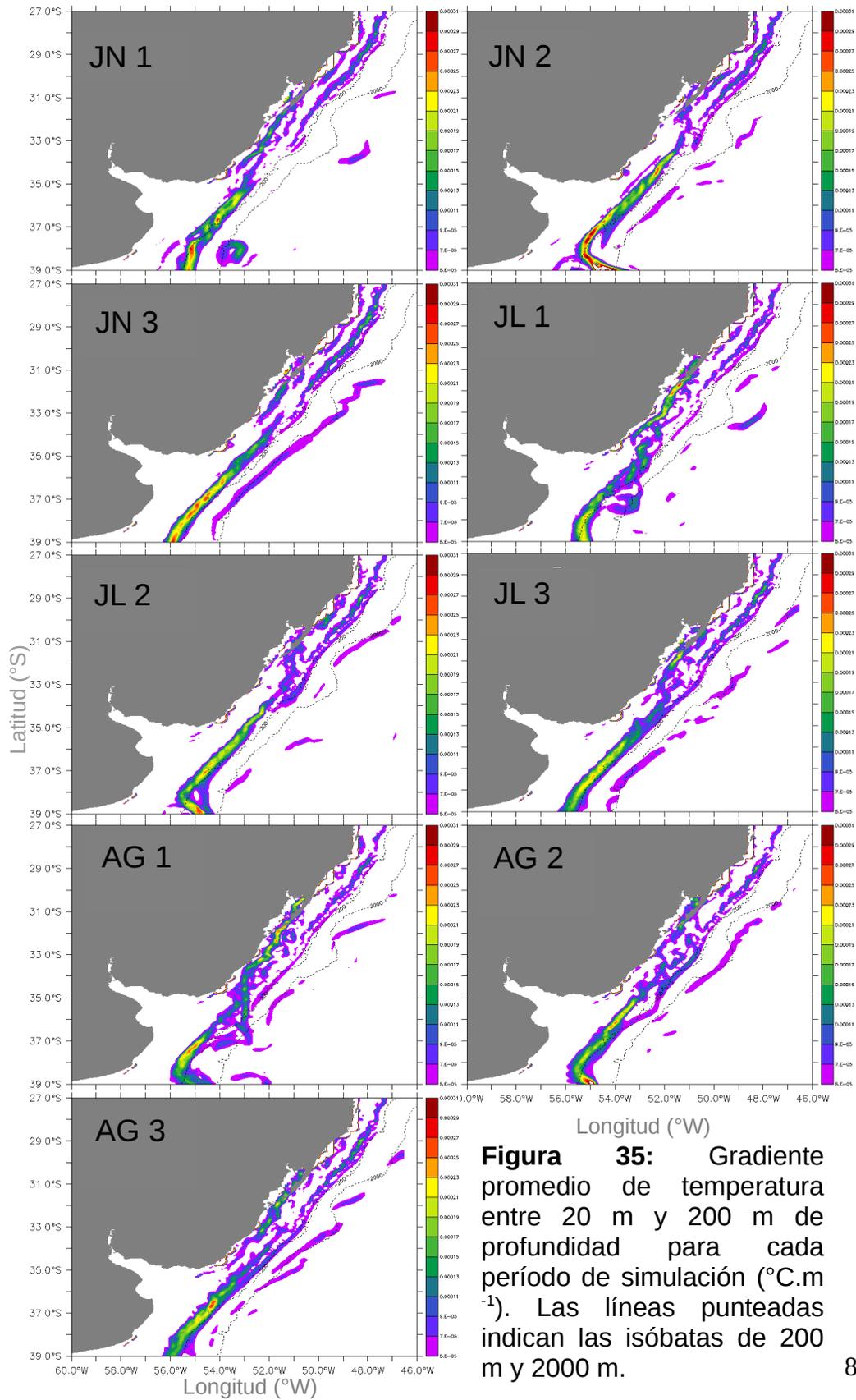


Figura 35: Gradiente promedio de temperatura entre 20 m y 200 m de profundidad para cada período de simulación ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$). Las líneas punteadas indican las isóbatas de 200 m y 2000 m.

calculó el promedio de temperatura para toda la región entre los 20 m y 200 m de profundidad, teniendo en cuenta para el cálculo los 19 días de simulación (o sea, el promedio es también temporal). La razón por la cual se excluyen los primeros 20 m de la columna de agua es para evitar la

variabilidad superficial. Una vez calculado el promedio, al mismo se le calculó el gradiente horizontal de temperatura. Vale la pena aclarar que tendremos entonces un cálculo de frente para cada uno de los 9 experimentos. Así podremos reconocer las regiones donde éstos gradientes son más fuertes en cada período y poder ubicar geográficamente el frente sobre la plataforma. Además, una vez que sepamos la ubicación del frente podremos definir la ubicación de las zonas de liberación de las partículas.

En la figura 35 se puede observar un frente que sigue muy de cerca la isobata de 200 m y es máximo al sur de 35°S frente al Río de la Plata en todos los períodos donde se efectuaron los experimentos. Este frente de borde de plataforma se continúa sobre la plataforma continental en una región que varía, dependiendo del período, entre una zona más cercana a la costa alrededor de ~30°S y otra más alejada en ~36°S. La localización geográfica de esta porción de plataforma del frente es muy similar a la del Frente Subtropical de Plataforma observado, que en su descripción ubica (en promedio) su porción más somera alrededor de los ~33°S y se va alejando de la costa dejando la plataforma continental en ~36°S (Piola et al., 2000). En nuestro caso se puede observar que dependiendo del caso el frente coincide geográficamente de mejor o peor forma con la descripción bibliográfica, pero está presente en todos los casos analizados. El gradiente de la figura 35 representa en general la transición entre las isotermas de ~14°C y ~19°C, algo que coincide en buena forma con la descripción del STSF para el período de invierno (Piola et al.,

2000), marcando la transición entre SASW ($\sim 14^{\circ}\text{C}$) y la STSW ($\sim 19^{\circ}\text{C}$). En los períodos JN3 y AG3 el frente parece estar cortado en la plataforma media, porque las isotermas en esa región durante esos períodos se encuentran más separadas espacialmente resultando en un gradiente máximo más débil (Figura 35). Los campos de salinidad (no mostrados aquí) coinciden en buena forma con el gradiente en el quiebre de la plataforma al sur de $\sim 32^{\circ}\text{S}$, sin embargo no son del todo coincidentes con el frente térmico sobre la plataforma. La transición entre los valores típicos de SASW ($S\sim 34$) y de STSW ($S\sim 35,5$) se puede observar sobre la plataforma más al norte que el gradiente térmico. De acuerdo a la ubicación y valores de las isotermas que representan el frente, podemos decir que la definición del mismo parece ser una buena aproximación al STSF real y por tanto permite utilizar dicha definición para los experimentos.

3.2.3.2 Zonas de Liberación (ZIs)

La elección de las zonas de liberación o desove se planteó desde el punto de vista de la pregunta a responder. Así se llegó a una configuración que consta de tres zonas definidas donde se liberarán las partículas simulando eventos de desove de la especie objetivo (Zonas de Liberación, ZL) en la plataforma del ASO. Cada ZL tiene una dimensión de 0.5° de lado (latitud y longitud) y se extiende en profundidad desde los 10 m a los 50 m, cubriendo un probable rango de profundidad de desove (Alheit et al., 1991). Vale la pena aclarar que la restricción en profundidad es únicamente para el inicio del desove, ya que una vez que los huevos han sido liberados los individuos se ubicarán en la columna de agua de acuerdo a su densidad o a flujos verticales. Una de las ZL estuvo fija durante todos los experimentos frente a la boca del Río de la Plata (la

llamaremos ZL-RdIP). La ubicación de las otras dos ZL fueron elegidas dependiendo de la ubicación geográfica del STSF (definido en la sección 3.2.3.1, Figura 35) al momento de ocurrencia de dicho evento de desove. Una vez localizado el frente en cada período de simulación (Figura 36), se ubicó una ZL al Este (la llamaremos ZL-E) y otra al Oeste (la llamaremos ZL-W) del frente. Las mismas estuvieron separadas en todos los experimentos una distancia igual de 0.75° longitud. De esta forma se estandariza la extensión longitudinal del frente y logramos que éste sea un factor menos a tener en cuenta en el análisis (Figura 36). Con esta configuración se definieron los dos casos de posibles cruces a evaluar según la dirección del mismo (Figura 37):

- Caso I: Al fin de la simulación las partículas cruzaron el frente de E a W.
- Caso II: al fin de la simulación las partículas cruzaron el frente en dirección W a E.

De ésta forma podremos evaluar si los individuos desovados al ZL-E (ZL-W) del frente pueden cruzar el mismo, o si el frente actuó como una barrera o zona de retención de los mismos.

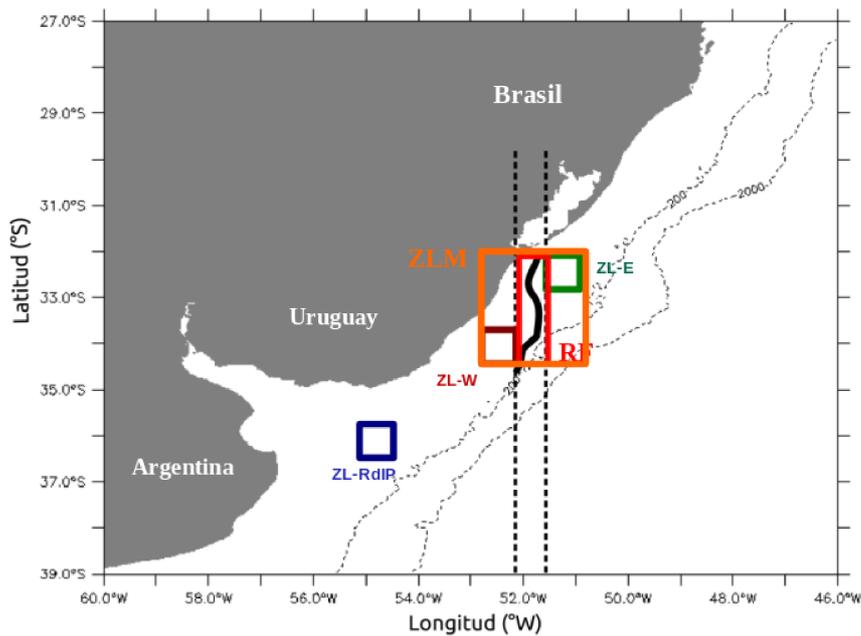


Figura 36: Esquema de la ubicación de las zonas de liberación (ZL-W: marrón y ZL-W: verde y ZL-RdIP: azul) respecto del frente (línea negra gruesa sólida) y esquema de la forma en la que se define el frente para evaluar los posibles cruces de una ZL hacia el otro lado del frente. La ZL-RdIP fue utilizada únicamente para evaluar el reclutamiento de los individuos que también nacen allí y no el cruce del frente. El frente se definió como la región comprendida entre las longitudes que definen los límites de las cajas (líneas punteadas negras). Encerrado en rectángulo rojo está esquematizada la Región Frontal (RF) según fue definida. Encerrado por el rectángulo naranja está esquematizada la Zona de Liberación Media (ZLM).

En cada experimento se liberó un número total de 100000 (cien mil) huevos cuya distribución se realiza al azar en cada una de las tres ZL elegidas por experimento. Dado que las zonas son del mismo tamaño, la cantidad de partículas por zona debería ser aproximadamente $\frac{1}{3}$ del total. Para responder la pregunta si el frente fue capaz de actuar como una barrera para huevos y larvas, se evaluó el porcentaje de individuos que al fin de los 19 días de simulación (o sea al final de cada experimento)

cruzaron la zona del frente a uno u otro lado del mismo sin tener en cuenta las distintas profundidades de las partículas, ya sea en dirección E a W, o de W a E (Figura 38). Con el fin de simplificar el análisis se tomaron como los límites E y W del frente a los límites E y W de cada una de las ZL ubicadas a cada lado del frente (Figura 37). De esta forma acotamos el frente a una región definida por dos longitudes ($^{\circ}$ E).

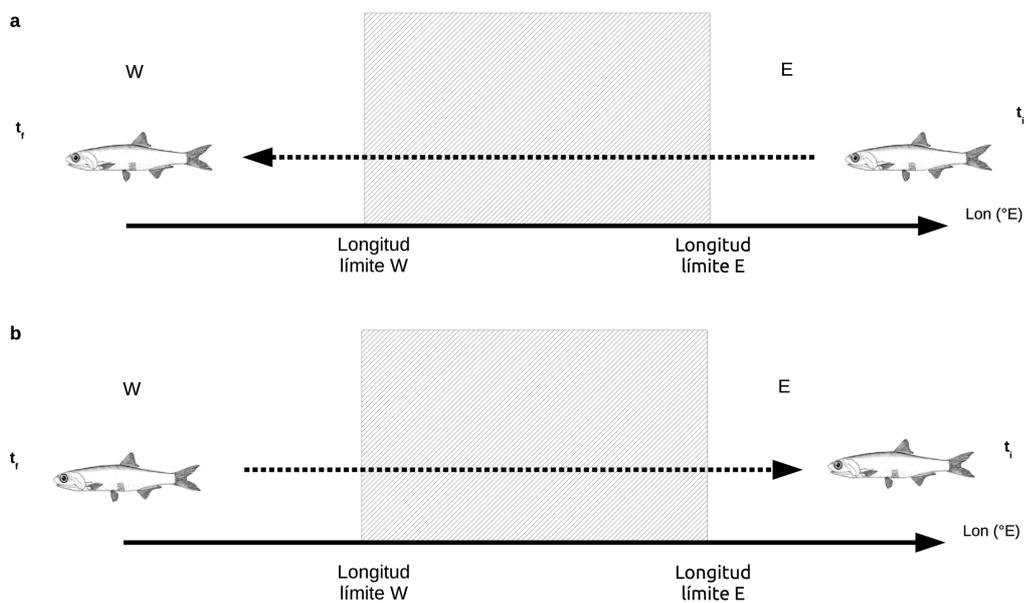


Figura 37: Caso I en el que se evalúa el cruce de los individuos liberados al E del frente a tiempo t_i y si a tiempo t_f cruzaron el frente de E a W (a). Caso II en el que se evalúa el cruce de los individuos liberados al W del frente a tiempo t_i y si a tiempo t_f cruzaron el frente de W a E (b). El rectángulo rallado simboliza el frente y las flechas punteadas la dirección del cruce.

Para evaluar el efecto local del transporte en la zona del frente se definió una región frontal (RF), como la región comprendida entre las zonas de liberación E/W y en un rango de profundidad definido entre 30 m y 100 m (Figura 36). Se entiende que dentro de la región se encuentra representado el frente y podremos crear índices que resalten alguna

característica del mismo. Así, dentro de la RF se calcularon los promedios para cada período de simulación de cada componente de la velocidad (u y v), su módulo y el gradiente de temperatura. De esta forma podremos evaluar si existe una correlación entre el cruce de partículas y la magnitud de alguno de estos índices. Una vez construidos los índices se calculó la correlación de Spearman (para disminuir la influencia de outliers) entre el porcentaje de partículas que cruzaron el frente y los componentes de la velocidad, el módulo de la velocidad y con el gradiente de temperatura.

3.2.4 Reclutamiento: criterio

Los criterios de reclutamiento estuvieron basados en parámetros que el Ichthyop permite predefinir, como ser la edad de la larva (días), su ubicación geográfica (°lat, °lon) y profundidad (m). Para nuestro caso se definió como criterio operativo que un individuo fue considerado recluta si al final de la simulación experimental (18 días) se encuentra en la plataforma continental (definida por la isobata de 200 m) entre las latitudes 27°- 42°S / 64° – 46.5°W. Es decir, se trata de un criterio de ubicación geográfica a una edad determinada. El criterio de edad corresponde con la talla en la cual los cambios morfológicos se encuentran lo suficientemente avanzados para permitir una movilidad significativa del individuo, según discutido anteriormente. La amplia región es porque en las muestras de ictiopláncton de la zona pueden encontrarse huevos y larvas en toda la región de la plataforma (Alheit et al., 1991), y se solapa con el rango natural de distribución de la población adulta. Con el fin de evaluar si existieron diferencias entre los años, períodos del año y entre las tres zonas de liberación en cuanto a esta variable se hizo un análisis de varianza (ANOVA). Debe notarse que para el presente ejercicio la definición operativa de reclutamiento no involucra

procesos de mortalidad por inanición o depredación, sino que se enfoca en los procesos advectivos relevantes a la pregunta bajo análisis.

3.2.5 Sensibilidad del número de individuos

Para conocer si los resultados de las simulaciones son afectadas por el número de partículas liberadas, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad. El análisis consistió en repetir el mismo experimento (JN2) utilizando cinco números de partículas: 1.000, 10.000, 50.000, 100.000 y 500.000. Para cada caso se calcularon los porcentajes de cruces del caso I y II, y los porcentajes de reclutas exitosos para cada una de las tres ZIs. Los resultados fueron comparados con los resultados de la simulación utilizada para el análisis en JN2.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Cruce de partículas a través del frente (casos I y II)

Se evaluó el cruce de partículas a través del frente en el sentido E-W (caso I) y W-E (caso II). En general se observó un bajo porcentaje de cruces en ambos sentidos, pero fueron considerablemente menores los del caso I (Figura 37, Tabla 3). En este último caso se registraron cruces con porcentajes muy bajos en los experimentos JN2 (0,27%) y AG3 (0,01%). Para el caso II el máximo fue registrado en el experimento JN3 (39,8%) mientras que el mínimo fue cero en tres de los nueve períodos analizados (JL3, AG2 y AG3).

El hecho que los cruces del caso I hayan sido escasos era algo que

podríamos haber esperado, pues los experimentos fueron realizados durante el invierno donde el sentido de las corrientes sobre la plataforma continental es predominantemente en sentido contrario a los cruces del caso I (NE). Siguiendo el mismo razonamiento en principio podríamos suponer que como las corrientes medias durante el invierno son favorables para el cruce en el sentido del caso II sería esperable observar mayores cruces del frente en éste caso. Sin embargo es llamativo que haya habido experimentos en los que el porcentaje fue bajo o no se registró ningún cruce. Esto sugiere la existencia de ciertas condiciones de flujo que favorecen los cruces en cada uno de los períodos analizados o que en algunos períodos el STSF podría estar actuando como una barrera para los individuos.

En los cruces de caso II existió una clara variabilidad interanual: solamente en un año (año 1) se registraron cruces en los tres períodos analizados, mientras que en el año 2 no se registraron cruces en el período AG2 y en el tercer año de simulación se registraron cruces únicamente durante JN3. Esta variación interanual parece ser más evidente si miramos los tres experimentos correspondientes al período de JN (10,5%, 5,6% y 39,8% en JN1, JN2 y JN3, respectivamente). La variabilidad en los períodos JL fue menor, 0 a 2,5% (Tabla 3).

Para el caso II JN fue el único período donde se registraron cruces en los tres años de simulación y JN3 fue aquel donde ocurrió el máximo (Tabla 3). Existió un descenso progresivo en los cruces caso II a medida que avanzó el período del año, es decir, los períodos JN fueron los que presentaron mayores porcentajes de cruces y los AG cuando se registraron los mínimos. Dicha relación fue confirmada mediante una correlación entre el porcentaje de cruces del caso II vs el período del año que resultó ser significativa ($r=-0,95$, $n=9$, $p= 0.001$).

Tabla 3: Porcentajes de partículas que cruzaron el frente al tiempo final de los experimentos para los dos casos analizados: Caso I, partículas liberadas al W del frente cruzan en dirección E. Caso II, las partículas liberadas al E del frente cruzan en dirección W.

Experimento	Caso II (% cruce de W a E)	Caso I (% cruce de E a W)
JN1	10,5	0
JN2	5,6	0,27
JN3	39,8	0
JL1	1,5	0
JL2	2,5	0
JL3	0	0
AG1	0,92	0
AG2	0	0
AG3	0	0,01

La alta correlación sugiere una relación clara entre el porcentaje de cruces del caso II y el período del año. La variabilidad año a año en los cruces resalta el hecho que a pesar de ser una simulación climatológica, ROMS representa una variabilidad durante los tres inviernos en las corrientes sobre la plataforma continental. Si bien un modelo climatológico no puede dar cuenta de la variabilidad interanual, es ésta variabilidad en el flujo es la que podría estar explicando las diferencias en los cruces. La región sobre la cual se realizaron los experimentos presenta una gran variabilidad estacional e interanual debido a, la descarga de agua dulce del RdIP, la migración de la CBM y el fenómeno de El Niño (Piola et al., 2000; Palma et al., 2008; Guerrero et al., 2014; Matano et al., 2014; Saraceno et al., 2014). Como vimos a lo largo del capítulo, se conoce que las poblaciones de peces pelágicos tan abundantes como la anchoita suelen experimentar grandes variaciones interanuales en el tamaño de su población y sabemos que variaciones interanuales en la circulación oceánica pueden llegar a ser un factor muy importante en el éxito o fracaso de el reclutamiento de los peces (Hjort, 1914; Illes & Sinclair, 1982; Sinclair, 1988).

3.3.2 Cruces y la Región Frontal (RF)

La exploración de relaciones estadísticas entre porcentaje de cruces y descriptores ambientales (gradiente promedio del frente, módulo promedio de la velocidad de corrientes, componentes u y v de la velocidad) calculados para la RF (Figura 37) indicaron correlaciones positivas de los cruces con el módulo ($r=0,8$, $n=9$, $p=0,01$) y las componentes zonal ($r=0,9$, $n=9$, $p=0,005$) y meridional ($r=0,7$, $n=9$, $p=0,04$) de las corrientes. Es decir, cuanto mayor son u, v y el módulo, mayor será el porcentaje de cruces del caso II. No existió relación entre cruces y gradiente promedio (una medida de la intensidad del frente) ($r=-0,1$, $n=9$, $p=0,7$) aunque es evidente una tendencia negativa que indica que a mayor intensidad menor cruce (Figura 38d).

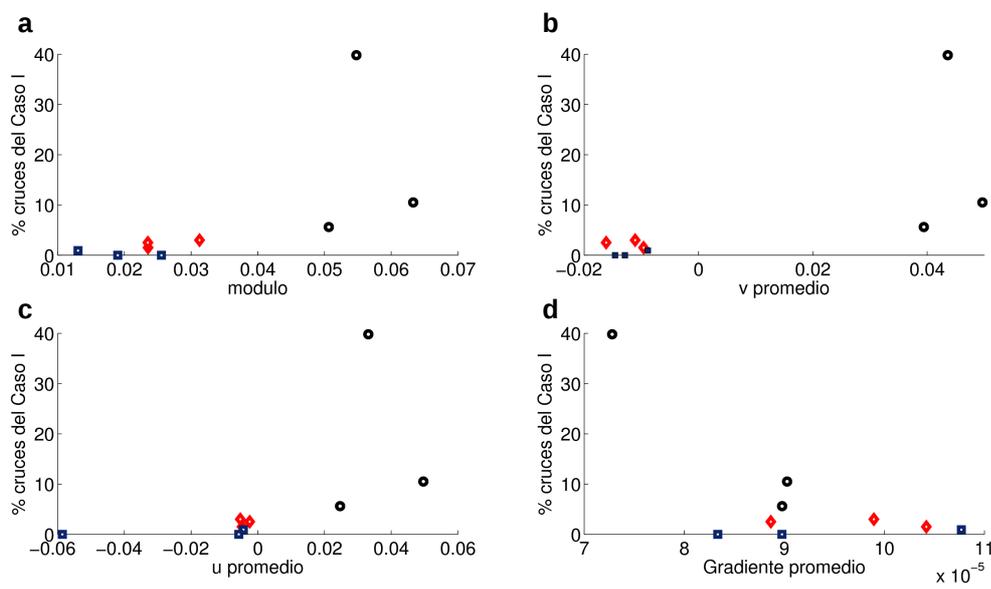


Figura 38: Porcentaje de cruces del Caso I vs módulo (a), velocidad v promedio ($m s^{-1}$) (b), velocidad u promedio ($m s^{-1}$) (c) y gradiente promedio ($^{\circ}C m^{-1}$) (d). JN = círculos negros, JL= rombos rojos y AG = cuadrados azules.

Al observar la Tabla 3 y la figura 38 podemos establecer claramente que

el período de JN es particularmente distinto a los otros dos períodos analizados. Es el único período en el que ambas componentes de la velocidad son positivas, indicando una dirección NE de las corrientes, y es contraria a los otros dos períodos considerados (Figura 38). A su vez JN presentó los mayores valores en la magnitud de la velocidad (módulo).

Se pudo observar que tanto el módulo como cada componente de la velocidad parecen ser importantes en el destino de las larvas. No sucede lo mismo con la magnitud del frente (estimado por el gradiente de temperatura medio) donde si bien existe una tendencia a que a mayor gradiente menor cruce del caso II se observan valores similares en la gran mayoría de los experimentos. En un principio se podría haber esperado que la magnitud del frente jugara un rol importante en los porcentajes de cruces si el frente estuviera actuando como barrera para los huevos y larvas de anchoita. Sin embargo aquí éste no parece ser el mecanismo principal que impide a las larvas cruzar o no el frente en los experimentos, sino que el rol más importante lo estaría jugando la magnitud y dirección del flujo durante cada experimento en particular.

Para lograr una mejor comprensión de los procesos que explican la gran variabilidad en los cruces del caso II se complementaron los análisis de relaciones estadísticas con un análisis detallado de los campos de velocidad durante tres de los nueve períodos simulados. Para ello se eligieron los períodos JN1, JN3 y AG3, por representar situaciones bien contrastantes, es decir el máximo de cruces registrado (JN3), el mínimo (AG3), y un caso intermedio (JN1).

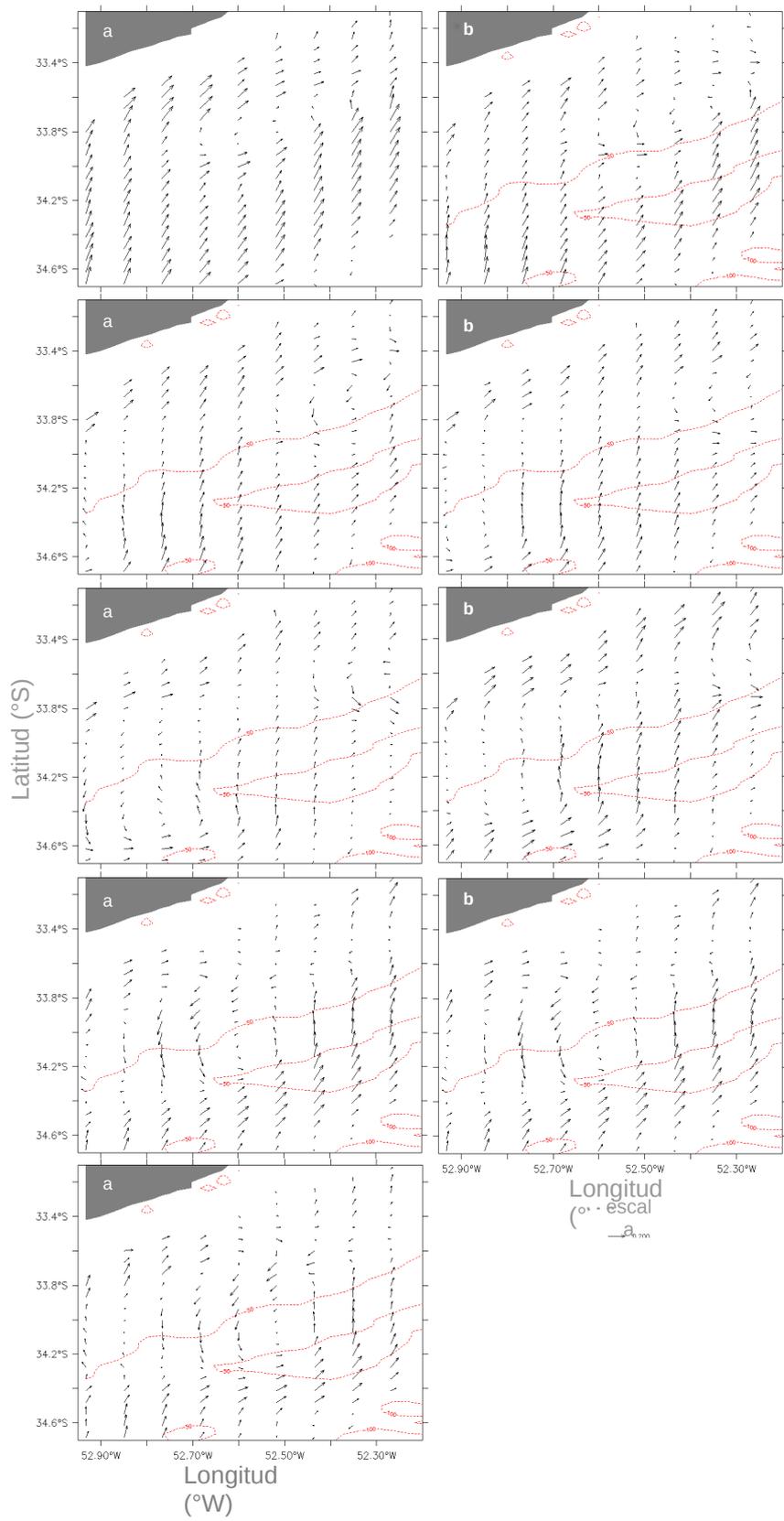
Las figura 39 muestra una versión simplificada del análisis, con una representación de las velocidades en la RF cada dos días. El período JN1 resultó ser el de mayor módulo promedio en la RF ($0,063 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Figura 38

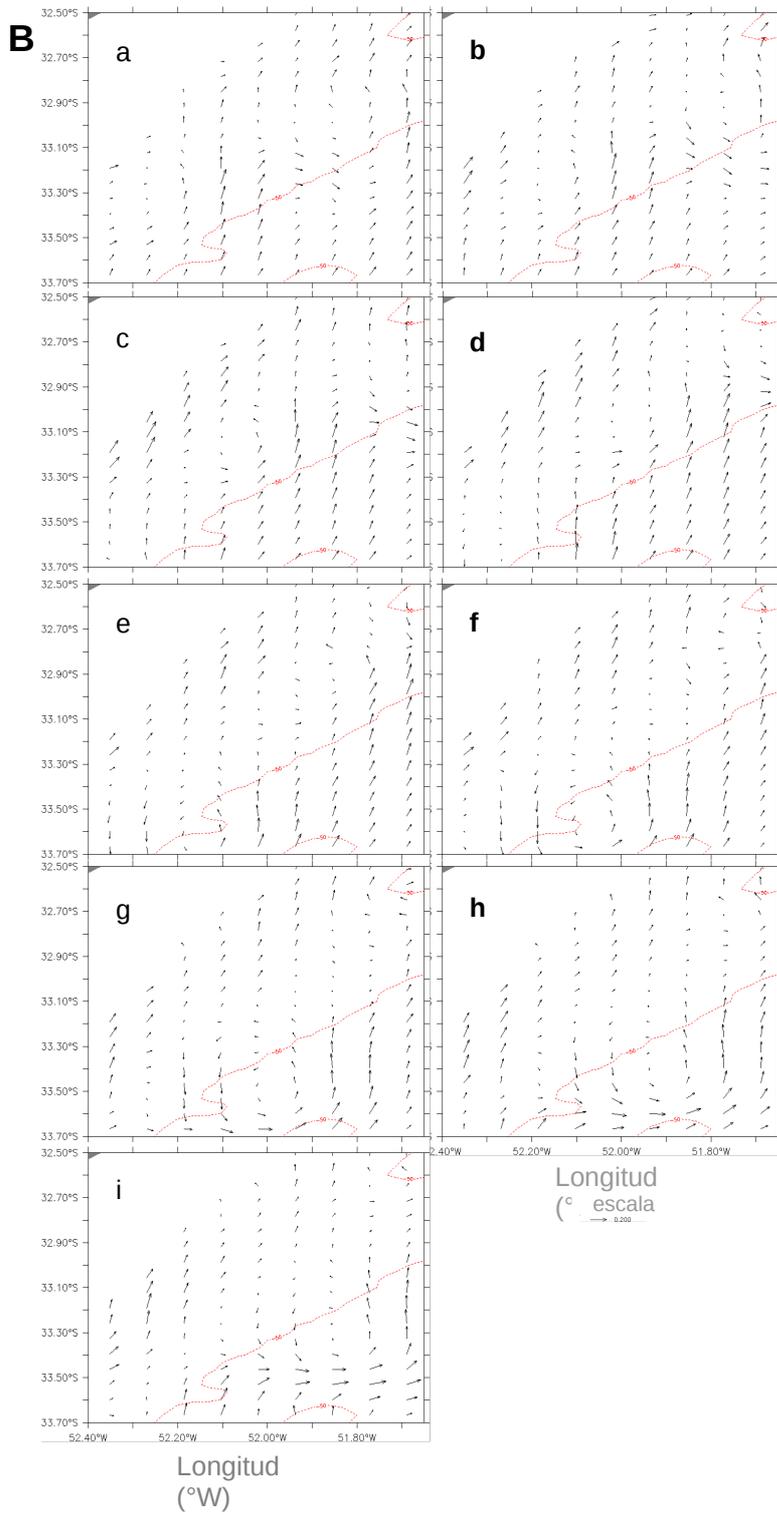
a). El período estuvo caracterizado por corrientes principalmente en dirección NE (o desde la caja W hacia la E) con una zona intermedia entre la costa y el talud de velocidad con dirección más variable (Figura 39 A). A medida que avanza el período se puede observar la existencia de cambios en la dirección y magnitud de la velocidad, la presencia de eddies, corrientes en sentido opuesto a los cruces registrados. O sea, si bien en promedio el período presenta el mayor módulo, es evidente una variabilidad en la dirección de las corrientes y que dicha variabilidad podría favorecer que no haya habido un cruce masivo en sentido W-E (caso II) durante éste período. Corrientes más constantes en dirección del cruce observado pueden identificarse en la porción costera, pudiendo ser las mismas las causantes de los mismos.

El período de JN3 presentó un porcentaje de cruces del caso II muy altos en comparación con el resto (Tabla 3). Sin embargo al analizar los campos de velocidad es notable que no haya una diferencia clara en la magnitud de las corrientes respecto a JN1 (en JN3 el módulo promedio es levemente menor $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Figura 38 a). Por otro lado pueden observarse diferencias en la dirección de la misma (Figura 39 B): se identifica una predominancia de corrientes en sentido NE como durante JN1, sin embargo a lo largo del período se generan corrientes en sentido W-E neto, incluso en los últimos 5-6 días de simulación se puede observar una fuerte corriente en dicho sentido sobre el extremo Sur del dominio representado (Figura 39 B). Estas corrientes están dirigidas directamente en el sentido del cruce y podrían ser las responsables de que se produzca una alta incidencia de cruces de caso II durante JN3.

Durante el período de AG2 (donde no se registran cruces de ningún tipo), puede observarse que las velocidades son de menor magnitud (también reflejada en el módulo promedio, $0,026 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Figura 39 a) y con una

variabilidad en la dirección muy notable. Esta variabilidad no refleja ningún flujo constante que pueda haber generado cruces durante el período del experimento y no parecen ser condiciones propicias para el cruce del frente (Figura 39 C).





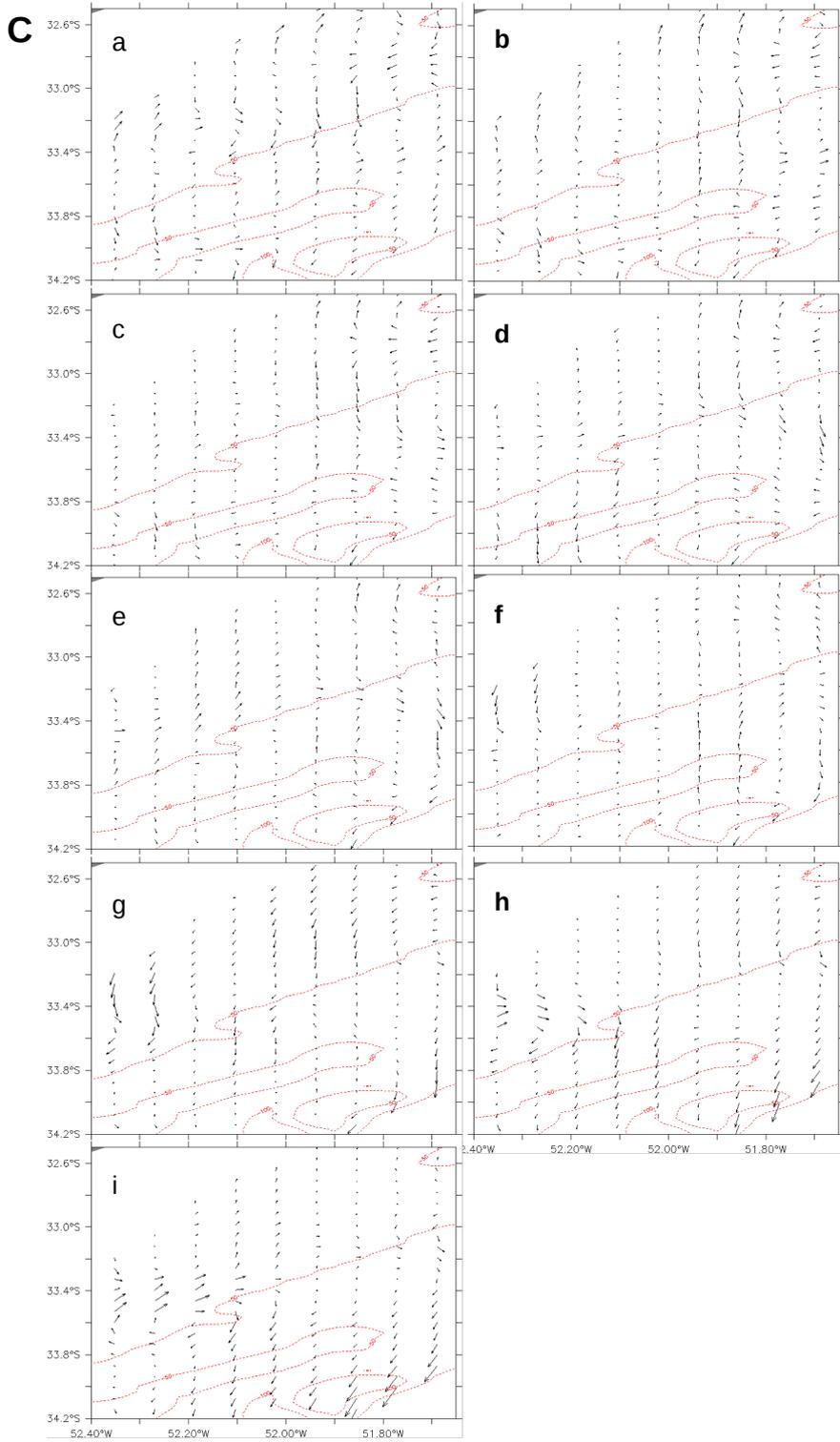


Figura 39: Velocidad promedio ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) cada dos días entre 30 y 100 m de profundidad en la RF para el período de **A)** Junio 1 (JN1), **B)** Junio 3 (JN3) y **C)** Agosto 2 (AG2). El período comienza arriba a la izquierda y se lee hacia la derecha y abajo. Las líneas punteadas rojas indican las isobatas de 50 m y 100 m.

Para complementar este análisis y reforzar la idea de que la dirección y magnitud de las corrientes puede ser un factor importante para que existan cruces sobre el frente, se tomó una región sobre la plataforma cuyos límites se construyeron tomando las Zonas de Liberación ubicadas más al norte, sur, este y oeste (llamaremos a la misma: Zona de Liberación Media) (Figura 36). En la misma se calculó el promedio y la varianza de ambas componentes de la velocidad para los tres períodos analizados usando la media entre 20 y 200 m. Por ejemplo, para el periodo de JN se promedian los 19 días de cada uno de los tres experimentos y se hace el promedio de esos tres. Asimismo se calcula la varianza para cada año y luego se promedia (Figuras 40, 41, 42). Así, en dicha zona pudimos observar que la variabilidad en la dirección de las corrientes reafirman la idea de que la dirección del flujo y su variabilidad sea la causa principal por la que pueden ocurrir cruces o no a través del frente, en particular cruces del caso II.

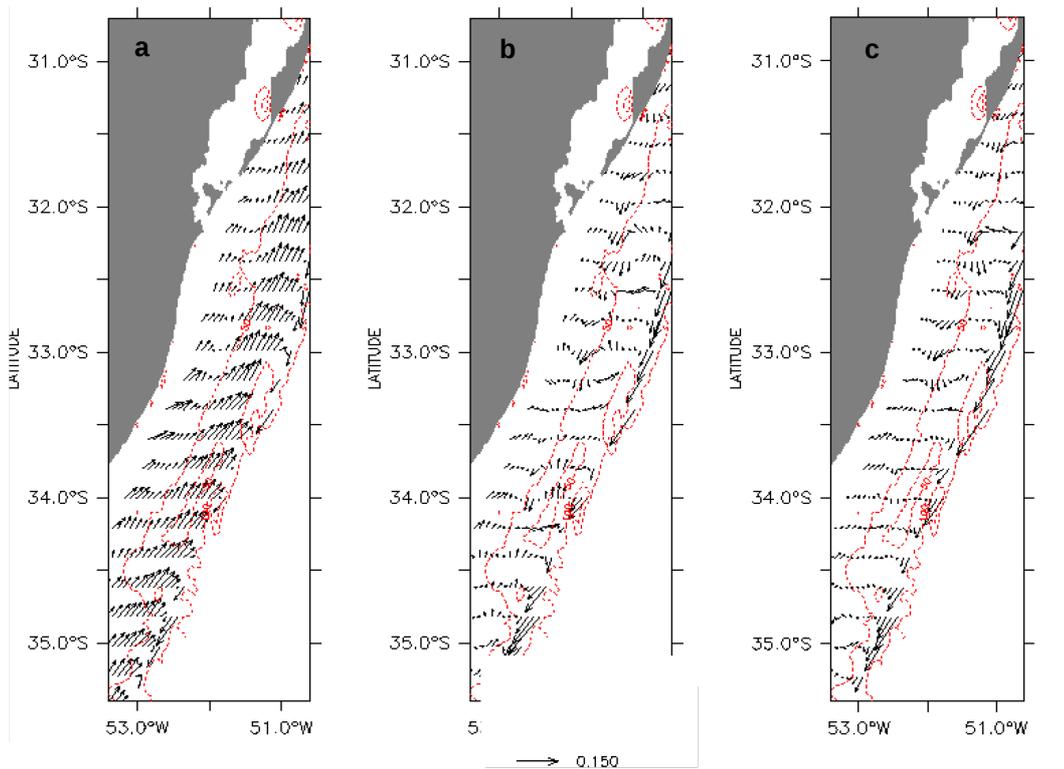


Figura 40: Vectores de velocidad media para la Zona de Liberación Media (ZLM) para los períodos de JN (a), JL (b) y AG (c).

El período JN es marcadamente distinto a los otros dos períodos como puede observarse claramente en la dirección de las corrientes, muy marcadas hacia el NE sobre la plataforma. Por otro lado, JL y AG fueron períodos con corrientes de dirección más variable y por tanto se observa menor cantidad de cruces (Figura 40). Cuando evaluamos la varianza de las componentes de la velocidad u y v en los tres períodos, se observa claramente cómo aumenta la variabilidad desde junio (menor variabilidad) a agosto (mayor variabilidad) para ambas componentes de la velocidad. Esto es otro indicador de que corrientes constantes en una dirección son determinantes en el destino de las larvas (Figura 41, 42).

Al parecer las corrientes medias son importantes porque marcan la dirección y magnitud del flujo medio sobre la región del frente en la

plataforma. Sin embargo pudimos observar que no es suficiente con las condiciones medias para un cruce significativo, ya que en períodos cortos de 5 o 6 días en los que la magnitud y dirección del flujo sean las adecuadas para un posible cruce de partículas pueden causar porcentajes altos de cruce en el frente (como en JN3). Es decir, la circulación de mesoescala sobre la plataforma, como eddies que duran ~1 semana, pueden generar eventos de cruce intensos. Entonces de acuerdo a los resultados cuanto mayor sea la variación diaria de, tanto la dirección como magnitud de la velocidad, menor será el cruce de partículas a través del frente.

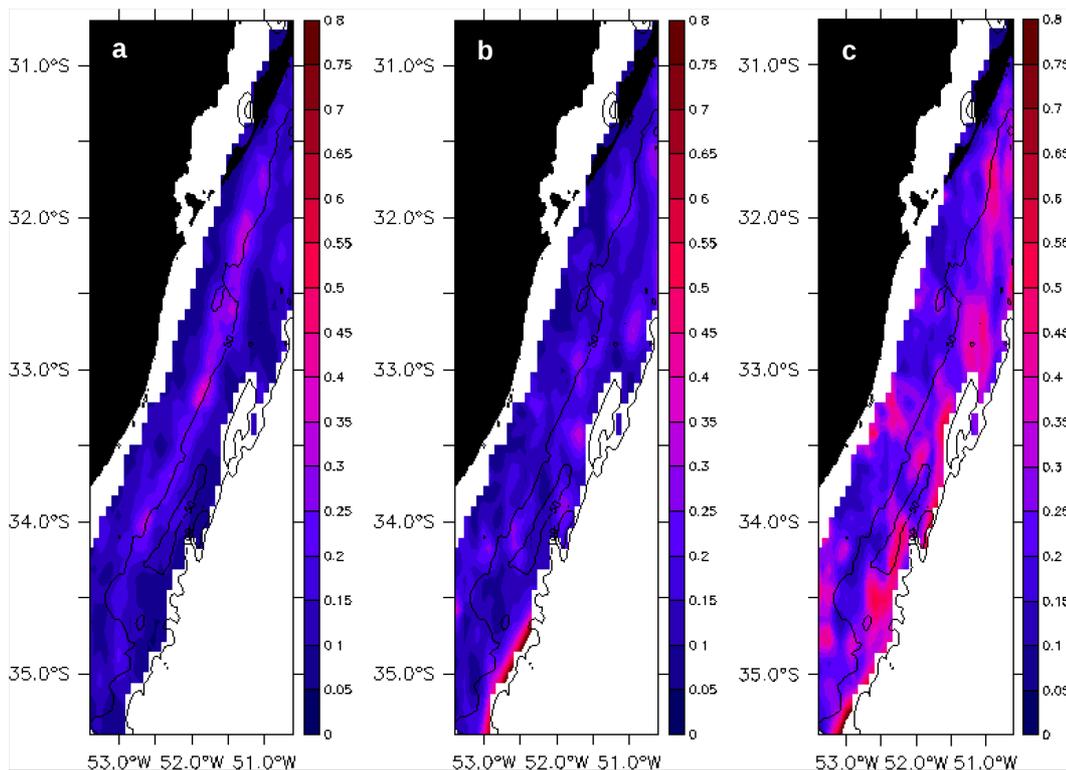


Figura 41: Varianza de la velocidad v media ($m^2 \cdot s^{-2}$) para la zona de liberación media para los períodos de JN (a), JL (b) y AG (c).

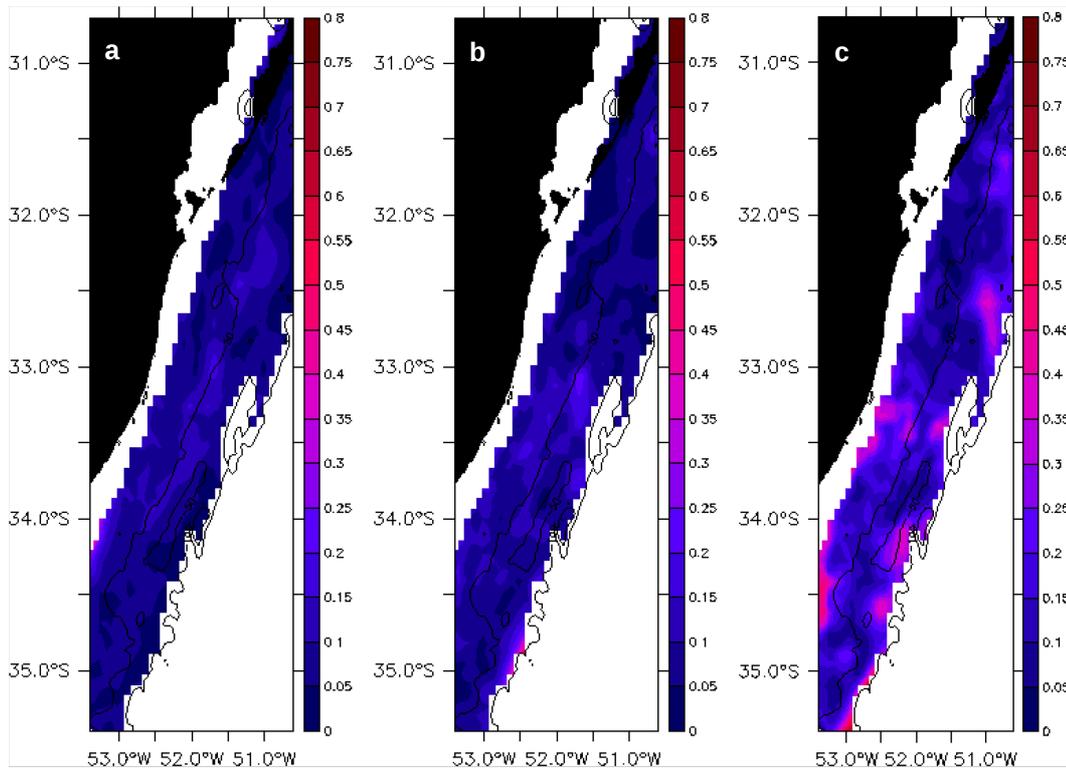


Figura 42: Varianza de la velocidad u media (m2.s-2) para la zona de liberación media para los períodos de JN (a), JL (b) y AG (c).

3.3.3 Reclutamiento

En términos generales existió un muy alto porcentaje de reclutamiento de acuerdo al criterio operativo definido en este trabajo (condición: la partícula se encontraba sobre la plataforma continental al día 18 de la simulación). Este porcentaje superó el 80% en todos los casos; en ocho de 27 casos analizados (ca. 30%) el reclutamiento fue del 100% y en 14 (52%) mayor al 90% (Tabla 4).

Tabla 4: Posición de las Zonas de Liberación (con sus límites lat, lon), el número de partículas liberadas en cada zona de liberación y el porcentaje de individuos que a tiempo final fueron reclutas exitosos.

Exp	ZL	°lat : °lat	°lon :°lon	N° part	N° Reclutas	% Reclutas
JN1	E	-33,1:-33,6	-51,7:-52,2	34964	31078	88,9
JN1	W	-34,2:-34,7	-52,95:- 53,45	31971	31971	100,0
JN1	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	33065	32206	97,4
JN2	E	-33,3:-33,8	-51,7:-52,2	45109	37466	82,1
JN2	W	-34,4:-34,9	-52,95:- 53,45	24039	24039	100,0
JN2	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	30852	30852	100,0
JN3	E	-33,4:-33,9	-52,15:- 52,65	34305	34198	99,7
JN3	W	-34,9:-35,4	-53,4:-53,9	33155	33155	100,0
JN3	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	32540	32540	100,0
JL1	E	-31,3:-31,8	-50,3:-50,8	34314	33675	98,1
JL1	W	-32,45:- 32,95	-51,55:- 52,05	33650	31141	92,5
JL1	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	32036	30248	94,4
JL2	E	-30,7:-31,2	-50,1:-50,6	34191	33551	98,1
JL2	W	-32,3:-32,8	-51,35:- -51,85	32407	32375	99,9
JL2	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	33402	33395	100,0
JL3	E	-32,5:-33	-51,15:- 51,65	34040	34040	100,0
JL3	W	-33,7:-34,2	-52,4:-52,9	33227	33227	100,0

JL3	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	32733	32432	99,1
A1	E	-32,5:-33	-51,15:- 51,65	32459	31380	96,7
A1	W	-33,7:-34,2	-52,4:-52,9	34937	31269	89,5
A1	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	32604	26128	80,1
A2	E	-32,7:-33,2	-51,15:- 51,65	34308	31681	92,3
A2	W	-33,7:-34,2	-52,4:-52,9	32975	32836	99,6
A2	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	32717	30464	93,1
A3	E	-33,1,-: -33,6	-51,7:-52,2	34380	34348	99,9
A3	W	-34,3:-34,8	-52,95:- 53,45	33161	31187	94,0
A3	RdIP	-35,75:- 36,25	-54,5:-55	32459	26003	80,1

Se evaluó si el reclutamiento es modulado por el período de liberación, la ZL (Zonas de Liberación) o el año. Para esto primero se graficaron los boxplot de cada variable respecto al porcentaje de reclutas para observar cual de las tres variables es más o menos significativa respecto del mismo (Figura 44). Segundo, para poder evaluar la significancia de los factores, se realizaron tres análisis de varianza (ANOVA) combinando al porcentaje de reclutas exitosos con los tres factores (ZL, período de liberación y año). No se pudo hacer un ANOVA de tres vías (o sea entre las tres variables) debido a la falta de réplicas de los experimentos.

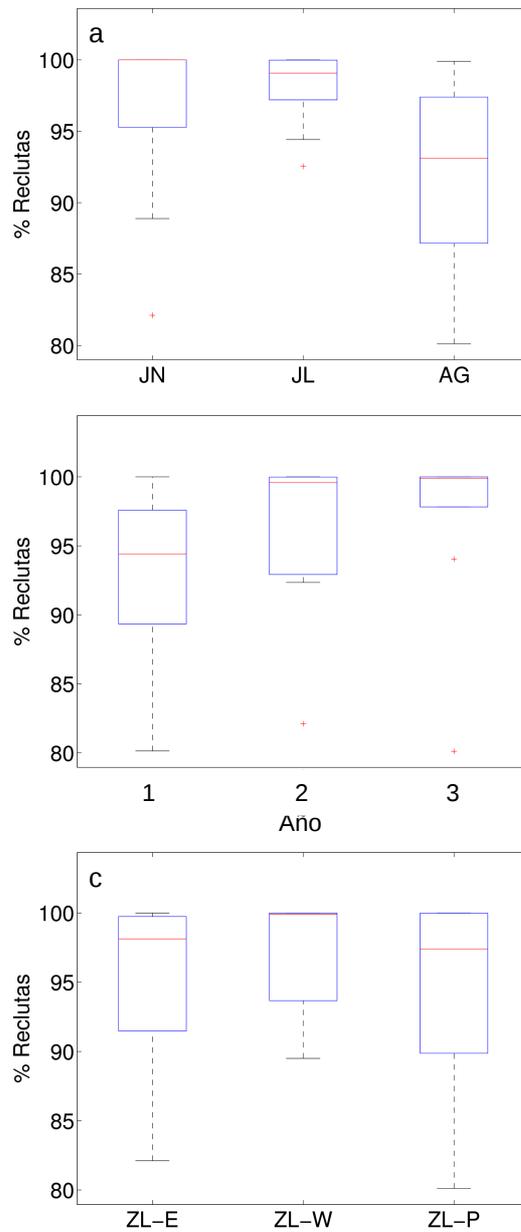


Figura 44: Reclutamiento (%) en función de a) zona de liberación, b) período (junio JN, julio JL y agosto AG), c) años (1: primer año, 2: segundo y 3: tercer año de simulación).

En general al analizar los boxplots no se puede notar ningún patrón claro de las variables dentro de los mismos. Con respecto a las zonas de liberación no puede distinguirse ninguna diferencia clara entre las mismas a partir de los boxplots. Si miramos los períodos, podríamos decir que JN

y JL parecen ser los de mayor reclutamiento y que los AG son algo menores a la vez que si miramos los años podríamos decir que el boxplot indicaría al año 3 de simulación como el de más alto reclutamiento (Figura 46).

De los ANOVA para las combinaciones de los tres factores el período de liberación, y la interacción entre período y zona se identificaron como factores significativos sobre el porcentaje de reclutamiento (Tabla 4). De acuerdo a la tabla 3 durante JN la caja E tiene el menor reclutamiento, mientras que durante AG la caja RdIP es la que tiene el menor reclutamiento y seguramente sea esto lo que refleja el resultado del ANOVA.

Tabla 5: ANOVA de dos vías para el % de reclutas exitosos teniendo en cuenta el período (JN, JL y AG) y las ZIs (ZL-E, ZL-W y ZL- RDLP).

Data	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Período	194,2	2	97,1015	4,26	0,0306*
ZLs	55,73	2	27,867	1,22	0,318
Período x ZLs	365,1	4	91,2751	4	0,0171*
Error	410,6	18	22,811		
Total	1025,63	26			

* Correlación significativa al 5%

Estudios previos sobre los posibles mecanismos que favorecen el reclutamiento de la anchoita destacan que esta especie está sujeta a diversos mecanismos dependiendo de la región en la que se encuentren dentro del área de distribución de la misma (Bakun & Parrish, 1991; Alheit et al., 1991). Estos autores hacen referencia a la plasticidad que muestra la especie en la región para maximizar su éxito reproductivo. Así, establecen que sobre la plataforma frente al RdIP una circulación

antihoraria en la desembocadura del estuario junto con un transporte de Ekman dirigido hacia la costa serían los mecanismos principales propuestos para la retención larval. Sobre la plataforma sur de Brasil el transporte de Ekman dirigido hacia la costa durante el invierno sería el mecanismo principal para retener las larvas sobre la plataforma. En éste trabajo no se profundizó particularmente en ninguno de los mecanismos comentados, sino más bien se analiza la importancia de la región y período del año en el que puede ocurrir un evento de desove. Desde este punto de vista no se pudo encontrar diferencias significativas dentro de la región o dentro de los distintos meses del invierno en el cual se vea favorecido particularmente el éxito en el reclutamiento de la especie.

Cuando hablamos del reclutamiento debemos recordar que el mismo es función de un gran número de procesos físicos y biológicos que involucran varias etapas en la vida de los peces (Cowan & Sahw, 2002). En ese sentido, el criterio de reclutamiento utilizado en el presente trabajo debe entenderse como el de un reclutamiento máximo potencial, resultante de un conjunto de limitaciones estrictamente físicas vinculadas a procesos de advección fuera del hábitat de la población original. El reclutamiento efectivo dependerá de la acción de procesos biológicos de mortalidad que reducirán el número total de potencial reclutas, por ejemplo depredación, inanición, infecciones, etc. El éxito dependerá también de los factores biológicos mencionados anteriormente. El agua que es transportada hacia el norte durante el invierno sobre la plataforma continental tiene una alta carga de nutrientes, y fertilizan la plataforma sur de Brasil durante su excursión (Lima & Castello, 1995). Es posible que la anchoita aproveche dicha excursión y extensión de agua de temperatura, salinidad y nutrientes adecuada para mantenerse sobre la plataforma continental. De ésta forma la anchoita estaría aprovechando condiciones oceanográficas favorables que le permiten mantenerse en un hábitat

adecuado para su desarrollo como es la plataforma continental. Esto va en el mismo sentido que las teorías generales sobre el reclutamiento, en las cuales se analiza el éxito o no de una clase anual de acuerdo a como los factores oceanográficos pueden favorecer de una forma u otra la supervivencia de los huevos y larvas (Hjort, 1914; Cushing, 1969; Lasker, 1975, 1978; Illes & Sinclair, 1982).

Del mismo modo se ha propuesto que un flujo constante en una dirección puede llegar a ser un mecanismo que mantenga una cohorte de huevos y/o larvas sobre una zona en particular (Miller, 2002). En nuestras simulaciones, sobre todo durante el período JN se evidencia una corriente hacia el norte sobre la plataforma continental, porque podría ocurrir que la anchoita utilice dicha corriente sobre la plataforma para mantener sus huevos y larvas sobre la misma y maximizar el reclutamiento durante el invierno.

3.3.4 Análisis de sensibilidad del número de individuos

El análisis de sensibilidad indicó que el porcentaje de cruces y el reclutamiento se mantuvieron prácticamente inalterados al variar el número de partículas liberadas en un rango de 1000 a 500000. Ello indica que el número de partículas liberadas en los experimentos (100000) fue adecuado para generar un resultado robusto e insesgado de los estimadores utilizados (Tabla 6). Los resultados fueron cualitativamente idénticos y cuantitativamente muy similares en todos los casos, independientemente del número de partículas utilizadas en la simulación. En el análisis de sensibilidad los porcentajes de cruces variaron entre 5.3 y 6 % para el caso I y entre 0.23 y 0.29 % para el caso II (o sea del orden de un 15% de variación). En relación al reclutamiento, para las partículas

liberadas en las zonas W y RdIP éste fue de 100% en todos los casos, independientemente del número de partículas liberadas; para la zona E, el reclutamiento varió entre 80.6 y 82.3 %. Así, los reclutas exitosos no muestran grandes variaciones (Tabla 6). Además, en general no existió una relación o tendencia monótona entre el número de partículas liberadas y la variable respuesta (porcentaje de cruces o reclutamiento). La excepción fue el reclutamiento de partículas liberadas en la zona E, el cual creció levemente al incrementar el número de partículas en la simulación.

Tabla 6: Resultado del porcentaje de reclutas exitosos para el análisis de sensibilidad sobre el número de partículas liberadas en los experimentos para el período JN2.

Exp. JN2 N° part.	% de Reclutas			Caso I (% cruce de W a E)	Caso II (% cruce de E a W)
	ZL-E	ZL-W	ZL-RdIP		
1000	80,6	100	100	6,0	0,29
10000	81,8	100	100	5,3	0,25
50000	82,0	100	100	5,4	0,26
100000*	82,1	100	100	5,6	0,27
500000	82,3	100	100	5,5	0,23

* Número de partículas utilizado en todos los experimentos del trabajo

3.4 Conclusión

Como resultado principal se destaca que los porcentajes de cruces que se dieron en el frente fueron relativamente bajos salvo casos puntuales (JN3) y que el probable cruce de individuos sobre el frente no parece estar regulado por la intensidad del mismo (intensidad del gradiente de temperatura del frente) sino más bien parece estar regulado por la magnitud y dirección de las corrientes sobre la plataforma continental,

tanto de las condiciones medias como de su variabilidad a escala sinóptica. Durante el invierno las corrientes tienden a ser predominantes hacia el NE (en dirección de cruce favorable para el caso I), hecho que se vio reflejado en la diferencia que hubo entre los casos I y II. Existió una clara diferencia entre el período JN y los otros dos (JL y AG) en cuanto a los porcentajes de cruces y dirección de la velocidad. Esto último se vio reflejado en los porcentajes de cruces del caso I y fortalecen la idea de que tanto la dirección como magnitud de las corrientes parecen ser la principal causa de un posible cruce a través del frente. Se pudo notar como bajo condiciones donde las corrientes fueron de mayor magnitud y dirección favorable al cruce durante períodos relativamente cortos de tiempo (5 o 6 días) el porcentaje de cruces puede ser considerable como en JN3. Por otro lado, en períodos donde tanto la magnitud como la dirección de las corrientes es más variable los cruces pueden llegar a ser muy bajos o incluso en algunos casos nulos (AG2). En definitiva los cruces sobre el frente fueron generalmente bajos, sin embargo es difícil establecer si efectivamente fue la presencia del STSF en el lugar lo que impide el cruce de las partículas ya que aunque existió una tendencia a que cuanto menor intensidad mayor cruce, la magnitud del mismo fue muy similar en todos los casos y la correlación fue no significativa. Lo que si podemos decir es que durante períodos cortos el STSF puede “romperse” y se puede generar un cruce significativo (como en JN3).

En cuanto al reclutamiento, los experimentos mostraron en general un alto porcentaje de reclutas exitosos para el criterio establecido. Esto es importante ya que la anchoita es una especie que habita principalmente la plataforma continental y su área de reproducción es sobre la misma. Otros trabajos han estudiado los mecanismos por los cuales los huevos y larvas de anchoita pueden permanecer sobre la plataforma continental, identificando como el principal para nuestra región el transporte de Ekman hacia la costa (Bakun & Parrish, 1991). En nuestro caso no se pudo

encontrar diferencias significativas entre las distintas zonas de liberación, el período ni el año en el que fueron liberadas las partículas y todos mostraron un alto valor de reclutamiento. Finalmente, un estudio de sensibilidad demostró que el número de individuos liberados no fue un factor incidente en los cruces ni el reclutamiento.

CAPÍTULO IV: CONSIDERACIONES FINALES

La descripción y comprensión del STSF es un tema actual de investigación, incluyendo su efecto en la circulación de plataforma, en la productividad y en el plancton en general. Son pocas las campañas oceanográficas específicamente dirigidas a estudiar el frente mismo. El presente trabajo constituye el primer acercamiento a través del uso y acoplamiento de modelos de circulación oceánica regional y los MBI para el Uruguay y particularmente el primero focalizado al estudio del STSF. Este tipo de trabajo abre una línea de investigación inexistente en el país como es el acople de modelos de circulación oceánica con modelos biológicos (MBI). Como hemos visto estas herramientas numéricas tienen un potencial muy grande para el estudio del sistema oceánico, sobre todo porque constituyen un complemento a las costosas campañas oceanográficas, que pueden guiar la planificación de las mismas y ayudan a la interpretación de las observaciones. Los MBI han demostrado ser una herramienta muy útil para el estudio del ictioplancton, para identificar zonas de desove, de cría y evaluar en cada región en particular cuales pueden ser los mecanismos que garantizan un reclutamiento exitoso o el posible fracaso de una clase anual (Lett et al., 2015).

El modelo (ROMS) fue implementado en condiciones climatológicas y representó relativamente bien la circulación en la región y el STSF pero sin dudas tiene muchos aspectos en los cuales mejorar y variables a tener en cuenta. Por ejemplo un paso siguiente sería agregar a su configuración los forzantes de marea y el flujo de descarga de agua dulce del Río de la Plata y de la Laguna de los Patos. Pese a esto el modelo representó bien la salinidad y la circulación regional. Es de esperar que la inclusión de estos factores ayude a obtener simulaciones aún más realistas. La

elección de la región, su resolución espacial horizontal y vertical son otros factores que perfectamente se podrían cambiar. Por ejemplo, en nuestro caso el límite norte del dominio en la grilla hija podría haber sido algo mayor, es decir, tomar latitudes más bajas ya que durante el invierno el frente estaba cercano a ese límite, aunque como se vio ésta configuración fue adecuada. Todas estas mejoras no son triviales e implican un trabajo intenso de modelación numérica que se podrán abordar en estudios futuros. El hecho de trabajar con modelos hace que el abanico de posibilidades de factores a ajustar, mejorar, cambiar sea muy grande y por eso hay que ir paso a paso, por lo que entendemos preferible tener una configuración simple.

Los MBI son una herramienta cuyo uso está en pleno crecimiento y estudio de sus posibilidades, fortalezas y debilidades. Al igual que para el modelo físico, las posibilidades de mejorar la configuración son enormes. Existen muchos parámetros que no hemos tenido en cuenta porque nuestra pregunta así lo permitió. Sin embargo es relativamente sencillo cambiar la configuración para abordar otras preguntas ya sea para la anchoita como para cualquier otra especie de pez o componente del plancton e incluso partículas inertes como partículas de plástico. Pero cada cambio o nuevo parámetro que se agrega o quita lleva a un nuevo análisis e interpretación de los resultados.

La anchoita es una especie que permite una gran versatilidad para responder preguntas sobre su ciclo de vida ya que sus huevos y larvas suelen estar presentes durante todo el año sobre la plataforma continental, son fácilmente reconocibles en las muestras de ictiopláncton y además suelen ser las más abundantes. Es una especie que tiene un gran potencial de explotación en la región pero su posición en la cadena trófica y su enorme abundancia la convierte en una especie muy

importante para el ecosistema del ASO. Un estudio integral de esta especie puede significar estudiar a la vez toda una gran parte del ecosistema pelágico, la productividad, las masas de agua asociadas, sus presas, predadores, etc. Además, se relaciona que a mayor número de huevos y larvas de anchoita en las muestras de ictiopláncton, mayor es el número de huevos y larvas de otras especies (Ciechowski, 1970). Entonces estudiar el o los mecanismos de reclutamiento de la anchoita podría perfectamente implicar que se estudie el de muchas otras especies que comparten el hábitat con la misma.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acha, E. M., Mianzan, H. W., Guerrero, R. A., Favero, M., & Bava, J. (2004). Marine fronts at the continental shelves of austral South America: physical and ecological processes. *Journal of Marine systems*, 44(1), 83-105.

Acuña, A. A., & Castello, J. P. (1986). Estructura de la población, crecimiento y reproducción de *Engraulis anchoita* (Hubbs & Marini 1935) en el sur del Brasil. *Revista Biología Marina, Valparaíso*, 22(1), 31-60.

Aleman, D., Acha, E. M., & Iribarne, O. (2009). The relationship between marine fronts and fish diversity in the Patagonian Shelf Large Marine Ecosystem. *Journal of biogeography*, 36(11), 2111-2124.

Alheit, J., de Ciechowski, J., Ebel, C., Ehrlich, M. D., Elgue, J. C., Mantero, G., ... & Odebrecht, C. (1991). SARP studies on Southwest Atlantic anchovy, *Engraulis anchoita*, off Argentina, Uruguay and Brazil. ICES.

Bakun, A. (1996). *Patterns in the Ocean: Ocean Processes and Marine Population Dynamics*. University of California Sea Grant in Cooperation with Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste Baja California Sur, San Diego, La Paz, 323 pp.

Bakun, A., & Parrish, R. H. (1991). Comparative studies of coastal pelagic fish reproductive habitats: the anchovy (*Engraulis anchoita*) of the southwestern Atlantic. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 48(3), 343-361.

Campos, E. J., Velhote, D., & da Silveira, I. C. (2000). Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. *Geophysical Research Letters*, 27(6), 751-754.

CARP, 2015. <http://www.comisionriodelaplata.org/>

Castello, J. P. (1990). Synopsis on the reproductive biology and early life history of *Engraulis anchoita*, and related environmental conditions in

brazilian waters. Annex VII, IOC Workshop on Sardine/Anchovy Recruitment Project (SARP) in the Southwest Atlantic. Workshop report N°65: 1-5; UNESCO.

Castelo, J. P. (2007). Síntese sobre a anchoita (*Engraulis anchoita*) no sul do Brasil. In: Haimovici (org.). A prospecção pesqueira e abundância de estoques marinhos no Brasil nas décadas de 1960 a 1990: levantamento de dados e avaliação crítica. Brasília MMA/SMCQ, pp: 197-218.

Castro, B. D., Lorenzetti, J. A., Silveira, I. D., & Miranda, L. D. (2006). Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) eo Chuí (RS). O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil. EDUSP, São Paulo, 11-120.

Ciechomski, J. D. (1967). Investigations of food and feeding habits of larvae and juveniles of the Argentine anchovy *Engraulis anchoita*. CalCOFI Rep, 11, 72-81.

Ciechomski, J. D. (1968). Huevos y larvas de tres especies de peces marinos: *Anchoa marmorata*, *Brevoortia aurea*, y *Prionotus nudigula* de la zona de Mar del Plata. Instituto de Biología Marina (Mar del Plata), 17: 28 pp.

Ciechomski, J. D. (1970). Distribución y abundancia de huevos de anchoíta en el plancton frente a la Argentina, Uruguay y sud de Brasil; resultados de diez campañas oceanográficas, agosto 1968-agosto 1969. Publicación Serie Informes Técnicos. Proyecto de Desarrollo Pesquero FAO/Argentina. 25. 14 p.

Ciechomski, J. D., & Sánchez, R. P. (1984). Field estimates of embryonic mortality of Southwest Atlantic anchovy (*Engraulis anchoita*). *Meeresforschung*, 30(3), 172-187.

Ciechomski, J. D., & Sánchez, R. P. (1986). Problemática del estudio de huevos y larvas de anchoíta (*Engraulis anchoita*), en relación con la evaluación de sus efectivos pesqueros. *Reseña de veinte años de investigación. Comisión Técnico Mixta del Frente Marítimo* 1(1): 93-109.

- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Witter, D. L., & Richman, J. G. (1990). Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C10), 17877-17903.
- Cowan J.H. & Shaw R.F. (2002). Recruitment. En: Fuiman L.A. & Werner R.G. *Fishery Science: The unique contributions of early life stages*. UK, Blackwell Science Ltd. 2002. p: 88:111.
- Cushing, D. H., (1969) The regularity of the spawning season of some fishes. *Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 33:81–92.
- da Silva, A. M., Young, C. C., & Levitus, S. (1994). Atlas of surface marine data 1994, Vol. 4: Anomalies of fresh water fluxes. NOAA Atlas, NESDIS, 9.
- Ehrlich M.D. (2010). Huevos y larvas de actinopterigios. En: Cousseau et al., 2010. *Ictiología: Aspectos fundamentales; la vida de los peces sudamericanos*. Ed. Universidad de Mar del Plata: EUDEM. 2010. p:465:504.
- Emílsson, I. (1961). The shelf and coastal waters off southern Brazil. *Boletim do instituto oceanográfico*, 11(2), 101-112.
- Franco B.C., Muelbert J.E. & Magalhães Mata M. (2006). *Mesoscale physical processes and the distribution and composition of ichthyoplankton on the southern Brazilian shelf break*. *Fisheries Oceanography*, 15(1), 37-43.
- Fuiman L.A. & Werner R.G. (2002) *Fisery Science: The unique contributions of early life stages*. UK, Blackwell Science Ltd. 326 p.
- Fuiman L.A. Special Considerations of Fish Eggs and Larvae. En: Fuiman L.A. & Werner R.G. *Fisery Science: The unique contributions of early life stages*. UK, Blackwell Science Ltd. 2002. p:1:32.
- Gallego A., North E. & Petitgas P. (2007). *Introduction: status and future of modelling physical-biological interactions during the early life of fishes*.

Marine Ecology Progress Series. 347, 121:126.

Garzoli, S. L. (1993). Geostrophic velocity and transport variability in the Brazil-Malvinas Confluence. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 40(7), 1379-1403.

Guerrero R. A., Acha E. M., Framiñan M. B., Lasta C. A. (1997). Physical oceanography of the Rio de la Plata Estuary, Argentina. Continental Shelf Research. 17(7): 727-742.

Guerrero, R. A. Piola A. R., Molinari G. N., Osiroff A. P. y Jáuregui S. I. (2010). Climatología de temperatura y salinidad en el Río de la Plata y su frente marítimo Argentina-Uruguay. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Mar del Plata (Argentina).

Guerrero, R. A., Piola, A. R., Fenco, H., Matano, R. P., Combes, V., Chao, Y., ... & Strub, P. T. (2014). The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the Southwestern Atlantic Ocean: Satellite observations. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(11), 7794-7810.

Grimm, V. & Railsback, S.F. (2005). Individual-based Modeling and Ecology. Princeton University Press, 428 p.

Gordon, A. L. (1989). Brazil-malvinas confluence–1984. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 36(3), 359-384.

Gordon A., Barnier B., Speer D. & Stramma L. (1999). Introduction to special section: World Ocean Circulation Experiment: South Atlantic results. Journal of Geophysical Research: Oceans. 104(C9): 20859-20861.

Hansen JE. (2004). Anchoita (Engraulis anchoita). En: Boschi EE (ed.), El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros. Tomo 4. Los peces marinos de interés pesquero. Caracterización biológica y evaluación del estado de explotación. INIDEP, Mar del Plata, pp. 101–115.

Hjort, J. (1914). Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research. *ICES*, 20: 1–228.

Houde E.D. Mortality. (2002). En: Fuiman L.A. & Werner R.G. *Fisery Science: The unique contributions of early life stages*. UK, Blackwell Science Ltd. 2002. p:64:87.

Houde E. D. (2008). Emerging from Hjort's Shadow. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, Vol. 41: 53–70.

Iles, T. D., & Sinclair, M. (1982). Atlantic herring: stock discreteness and abundance. *Science*, 215(4533), 627-633.

Lasker, R. (1975) Field criteria for the survival of anchovy larvae: the relationship between inshore chlorophyll maximum layers and successful first feeding. *Fishery Bulletin, U.S.* 73, 453–462.

Lasker, R. (1978) The relationship between oceanographic conditions and larval anchovy food in the California Current: identification of factors contributing to recruitment failure. *Rapports et Procès-verbaux des Réunions, Conseil International pour l'Exploration de la Mer* 173, 212–230.

Lentini, C. A., Campos, E. J., & Podestá, G. G. (2000). The annual cycle of satellite derived sea surface temperature on the western South Atlantic shelf. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48(2), 93-105.

Lentini, C. A. D., Podestá, G. G., Campos, E. J. D., & Olson, D. B. (2001). Sea surface temperature anomalies on the Western South Atlantic from 1982 to 1994. *Continental Shelf Research*, 21(1), 89-112.

Leonarduzzi, E., Brown, D. R., & Sánchez, R. P. (2010). Seasonal variations in the growth of anchovy larvae (*Engraulis anchoita*) on the Argentine coastal shelf. *Scientia Marina*, 74(2), 267-274.

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(9), 1210-1214.

Lett, C., van der Lingen, C. D., Loveday, B. R., & Moloney, C. L. (2015). Biophysical models of larval dispersal in the Benguela Current ecosystem.

African Journal of Marine Science, 37(4), 457-465.

Lima, I. D., & Castello, J. P. (1995). Distribution and abundance of South-west Atlantic anchovy spawners (*Engraulis anchoita*) in relation to oceanographic processes in the southern Brazilian shelf. *Fisheries Oceanography*, 4(1), 1-16.

Maamaatuaiahutapu, K., Garçon, V., Provost, C., & Mercier, H. (1998). Transports of the Brazil and Malvinas Currents at their confluence. *Journal of marine research*, 56(2), 417-438.

Mann, K.H., Lazier, J.R.N. (2006). Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans. Third Edition. Blackwell Publishing. 512 pp.

Matano, R.P., Palma, E.D. & Piola, A.R. (2010). The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the southwestern Atlantic shelf circulation. Ocean Science. 6(4), 983-995.

Matano, R. P., Combes, V., Piola, A. R., Guerrero, R., Palma, E. D., Ted Strub, P., ... & Saraceno, M. (2014). The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the Southwestern Atlantic Ocean: Numerical simulations. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(11), 7949-7968.

Miller, T. J. (2002). Assemblages, communities, and species interactions. En: Fuiman L.A. & Werner R.G. *Fisery Science: The unique contributions of early life stages*. UK, Blackwell Science Ltd. 2002, 183-205.

Möller, O. O., Piola, A. R., Freitas, A. C., & Campos, E. J. (2008). The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Continental Shelf Research*, 28(13), 1607-1624.

Moyle, P. B, Cech Jr. J. (2004). Fishes: An Introduction to Ichthyology. 5th ed. Pearson. Prentice Hall. 726 pp.

Muelbert, J.H., Acha, M., Mianzan, H., Guerrero, R., Reta, R., Braga, E. S., ... & Ramírez, F. (2008). Biological, physical and chemical properties

at the Subtropical Shelf Front Zone in the SE-Atlantic Continental Shelf. Continental Shelf Research. 28(13), 1662-1673.

Olson, D. B., Hitchcock, G. L., Mariano, A. J., Ashjian, C. J., Peng, G., Nero, R. W., & Podesta, G. P. (1994). Life on the edge: marine life and fronts. *Oceanography, 7(2)*, 52-60.

Oliveira, L. R., Piola, A. R., Mata, M. M., & Soares, I. D. (2009). Brazil Current surface circulation and energetics observed from drifting buoys. Journal of Geophysical Research: Oceans, 114(C10).

Ortega, L., Martinez, A. (2007). Multiannual and seasonal variability of water masses and fronts over the Uruguayan shelf. Journal of Coastal Research. 23: 618–629.

Palma, E. D., Matano, R. P., & Piola, A. R. (2004). A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 109(C8).*

Palma, E. D., Matano, R. P., and Piola, A. R. (2008). A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Stratified ocean response to local and offshore forcing. Journal of Geophysical Research: Oceans, 113(C11).

Parada, C., Van Der Lingen, C. D., Mullon, C., & Penven, P. (2003). Modelling the effect of buoyancy 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.

Phonlor, G. (1984). Morfologia e biología de larvas de *Engraulis Anchoita* (Hubbs & Marini), (Osteichthyes, Engraulidae). *Atlántica, 7*, 85-98.

Piola, A. R., Campos, E. J., Möller, O. O., Charo, M., & Martínez, C. (2000). Subtropical shelf front off eastern South America. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 105(C3)*, 6565-6578.

Piola, A. R., & Matano, R. P. (2001). Brazil and Falklands (Malvinas)

currents. *Ocean Currents: a Derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*, 35-43.

Piola, A. R., Matano, R. P., Palma, E. D., Möller, O. O., & Campos, E. J. (2005). The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 32(1).

Piola A.R., Möller O.O., Guerrero R.A., Campos E.J.D. (2008). *Variability of the subtropical shelf front off eastern South America: Winter 2003 and summer 2004. Continental Shelf Research. 28(13), 1639-1648.*

Peterson, R. G., & Stramma, L. (1991). *Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. Progress in oceanography, 26(1), 1-73.*

Sánchez, R. P. (1989). *Annex V. Synopsis on the reproductive biology and early life history of Engraulis anchoita, and related environmental conditions in Argentine waters. In Second IOC Workshop on Sardine/Anchovy Recruitment Project (SARP) in the Southwest Atlantic. Montevideo, Uruguay, 21-23 August, 1989.*

Sánchez, R. P. (1990). *Synopsis on the reproductive biology and early life of Engraulis anchoita, and related environmental conditions in Argentine waters. IOC Workshop Rep. No 65; Annex V: 5-49; UNESCO.*

Saraceno, M., Provost, C., Piola, A. R., Bava, J., & Gagliardini, A. (2004). Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C5).

Saraceno, M., Provost, C., & Piola, A. R. (2005). *On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic. Journal of Geophysical Research: Oceans, 110(C11).*

Saraceno, M., Simionato, C. G., & Ruiz-Etcheverry, L. A. (2014). Sea surface height trend and variability at seasonal and interannual time scales in the Southeastern South American continental shelf between 27 S and 40 S. *Continental Shelf Research*, 91, 82-94.

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

Strub, P. T., James, C., Combes, V., Matano, R. P., Piola, A. R., Palma, E. D., ... & Ruiz-Etcheverry, L. A. (2015). Altimeter-derived seasonal circulation on the southwest Atlantic shelf: 27°–43° S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5), 3391-3418.

Thomczak, M. & Godfrey, J.S. (1994). *Regional Oceanography: An introduction*. Pergamon Press, 422 pp.

Thomsen, H. (1962). Masas de agua características del Océano Atlántico, parte sudoeste. *Servicio de Hidrografía Naval*. p: 1-27.

Vasconcellos, M. C., Freire, K. F., & Castello, J. P. (1998). Distribution patterns and feeding success of anchovy, *Engraulis anchoita*, larvae off southern Brazil. *Scientia Marina*, 62(4), 385-392.

Vaz, A. C., Parada, C. E., Palma, E. D., Muelbert, J. H., & Campos, E. J. D. (2007). Modeling transport and retention of *Engraulis anchoita* Hubbs & Marini, 1935 (Clupeiformes, Engraulidae) early life stages along the Central Southwestern Atlantic continental shelf. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* 2(2): 179-190.

Vera, M., 2011. *Distribución y ecología trófica en larvas de corvina (Micropogonias furnieri) y surel (Trachurus lathami) en el Río de la Plata*. Tesis de Maestría en Biología, Facultad de Ciencias Universidad de la República, Montevideo, 54 p.

Werner, F. E., and Quinlan, J. A. (2002). *Fluctuations in marine fish populations: physical processes and numerical modelling*. En: *ICES Marine Science Symposia*, 215: 264–278.

Whitehead, P.J.P., G.J. Nelson and T. Wongratana. (1988). *FAO species catalogue. Vol. 7. Clupeoid fishes of the world (Suborder Clupeoidei)*. An annotated and illustrated catalogue of the herrings, sardines, pilchards, sprats, shads, anchovies and wolf-herrings. Part 2 - Engraulidae. FAO

Fish. Synop. 7(125)Pt. 2:579 p.