

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CIRCULACIÓN Y FRENTE TÉRMICOS EN LOS GOLFOS NORPATAGÓNICOS

Mariano Tonini^{a,b}, Elbio D. Palma^{a,b}, y Andrés L. Rivas^c

^a*Instituto Argentino de Oceanografía, CONICET*

(8000) Bahía Blanca, Argentina (e-mail: mtonini@criba.edu.ar)

^b*Departamento de Física, Universidad Nacional de Sur y CONICET*

(8000) Bahía Blanca, Argentina (e-mail: uspalma@criba.edu.ar)

^c*Centro Regional Patagónico, CONICET*

(U9120ACV) Puerto Madryn, Argentina (e-mail: andres@cenpat.edu.ar)

Palabras Clave: Simulación numérica, circulación oceánica, Golfo San Matías, Frentes térmicos.

Resumen. La circulación oceánica en la región de los Golfos Norpatagónicos (Nuevo, San José y San Matías) está forzada por mareas excepcionales, vientos y un importante intercambio de calor y humedad con la atmósfera. La mezcla inducida por la marea y los vientos genera altos niveles de disipación y en zonas poco profundas puede llegar a inhibir la formación de la termoclina estacional, dando origen a intensos frentes térmicos con una alta productividad biológica asociada. En este trabajo empleamos un modelo numérico tridimensional para investigar los mecanismos físicos que regulan la intensidad de los giros de recirculación, particularmente en el Golfo San Matías (GSM) y Península Valdés (PV) y los regímenes de mezcla vertical que mantienen las estructuras frontales. Para alcanzar estos objetivos constituimos: (a) un experimento de control inicializado con valores climatológicos de temperatura y salinidad en la vertical forzado con mareas, vientos predominantes y flujo medio de calor de verano (b) experimentos de sensibilidad que contemplan variaciones en la estratificación y flujo de calor, batimetría e intensidad del viento. El experimento de control muestra algunas características observadas de la circulación de primavera-verano: un giro ciclónico (horario) en el interior del GSM y dos intensos frentes térmicos en la boca del GSM y noreste de la PV. Los resultados numéricos muestran además dos giros anticiclónicos en la costa oeste del GSM y al norte de la PV. El análisis de los experimentos de sensibilidad muestra que la intensidad del giro ciclónico del interior del GSM se halla regulada por la interacción de la marea con la estratificación (mantenida por el flujo de calor y humedad superficial) en presencia de topografía variable. Los giros anticiclónicos del GSM son mayormente regulados por el viento, mientras que los giros al norte de PV y sur del GSM son principalmente el resultado de la rectificación topográfica de la onda de marea.

1 INTRODUCCION

La región de los Golfos Norpatagónicos comprende los Golfos San Jorge (SJ), Nuevo (GN), y San Matías (GSM) y constituye una de las regiones oceanográficas más importantes de la Plataforma Continental Argentina (Acha et al., 2004) (Fig. 1a). La circulación oceánica en la región está caracterizada por amplitudes de marea excepcionales y un intenso intercambio de calor y masa con la atmósfera. El GSM parece estar dividido en dos zonas bien diferenciadas en cuanto a su productividad (Carreto et al., 1974): las que denominan “aguas propias del golfo” que cubren el sector norte y oeste del mismo están caracterizadas por una elevada temperatura y salinidad, una marcada termoclina y concentraciones limitantes de nitratos mientras que las que llaman “aguas de origen externo”, localizadas en el sector sur y sudeste, presentan menor temperatura y salinidad, ausencia de estratificación y concentraciones relativamente altas de nitratos. Piola y Scasso (1988) señalan la presencia durante gran parte del año de un frente termohalino orientado zonalmente en las proximidades de $41^{\circ} 50' S$, el cual separa las aguas más cálidas y salinas del sector norte de las más frías y menos salinas que ingresan por el sector sur. A partir de la distribución de propiedades hidrográficas encuentran que en verano la circulación está dominada por un giro ciclónico (horario) de unos 70 km de diámetro centrado en $41^{\circ}15'S$, mientras que hacia el sur las observaciones disponibles no alcanzan a definir claramente la circulación, aunque es aparente la presencia de dos giros de menores dimensiones, uno ciclónico al este y otro anticiclónico (antihorario) al oeste (Fig. 1a).

La mezcla inducida por las intensas corrientes de marea de la región genera altos niveles de disipación y en zonas de bajo fondos puede llegar a inhibir la formación de la termoclina estacional, dando origen en primavera y verano a frentes térmicos que definen la frontera entre aguas estratificadas y verticalmente mezcladas (Glorioso and Simpson, 1994). Asociado a estos sistemas frontales existe una alta tasa de productividad primaria y secundaria constituyéndose asimismo en estructuras oceánicas claves para entender la alimentación, reproducción y patrones migratorios de las poblaciones locales de aves y mamíferos (Acha et al., 2004). En la zona de estudio se han identificado mediante imágenes satelitales al menos tres intensos frentes de marea, uno de ellos cerca de la boca del GN, otro ubicado al sudeste de la Península de Valdés (PV) y el tercero en la boca del GSM y de dirección norte-sur (Glorioso and Simpson, 1994; Rivas, 2006, Sabattini and Martos, 2002). El Frente de Península Valdés es uno de los más importantes de la Patagonia, extendiéndose en dirección NE-SW desde cerca de $42^{\circ}S$ hasta $41^{\circ}30'S$ (unos 400km) (Fig. 1a). Análisis de imágenes satelitales y observaciones *in-situ* muestran que en promedio el frente de PV se encuentra a unos 50km de la costa al sur y alejándose de la misma a medida que avanza hacia el noreste (Fig. 1b). Existen, sin embargo, variaciones interanuales que pueden alejarlo hasta 80 a 120 km de la costa (Sabatini and Martos, 2002). El frente de PV comienza a formarse en la primavera temprana, mientras se forma la termoclina estacional y persiste hasta el otoño cuando la estratificación es erosionada por enfriamiento en invierno. Se cree que el frente se forma por la interacción de la intensa mezcla de mareas con la topografía submarina, desconociéndose el efecto del viento sobre su estructura.

La mayor parte del conocimiento actual sobre la circulación (corrientes) en los Golfos Norpatagónicos surge de modelos numéricos de baja resolución y que incluyen algunos de los mecanismos forzantes [Rivas, 1989; Mazio et al. (1994) en el GN, y Glorioso and Simpson (1994) y Palma (2002) en la zona que abarca los tres golfos], siendo muy limitada la contribución efectuada por las observaciones directas. Sin embargo, son aún numerosos los interrogantes asociados a la circulación que no pueden interpretarse adecuadamente en la

actualidad. En un trabajo anterior Tonini et al (2006) analizamos la circulación barotrópica (densidad constante) en la región mediante un modelo numérico tridimensional de circulación forzado por vientos y mareas. En este trabajo se extienden estudios previos mediante el empleo de un modelo baroclínico forzado con mareas, flujos de calor y humedad y vientos realistas diseñado para examinar principalmente la influencia de la topografía de fondo, el forzante y la estratificación sobre la dinámica de la circulación en el GSM y el FPV. En artículos posteriores discutiremos la variabilidad estacional e interanual de la circulación.

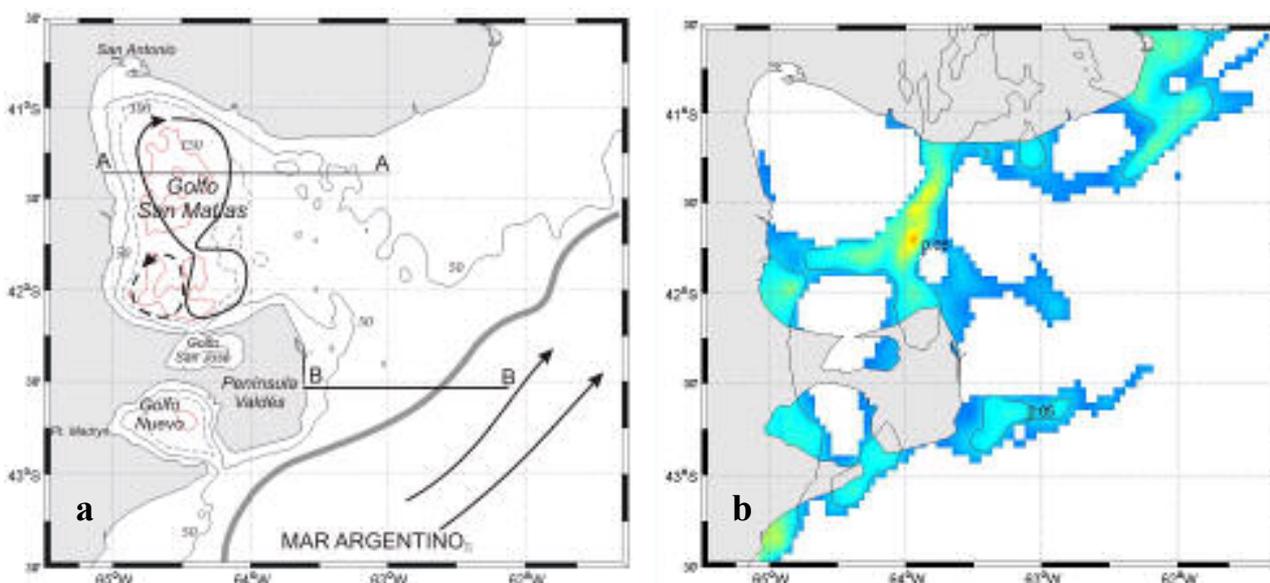


Figura 1. (a) Dominio computacional, topografía submarina (se indican las isobatas de 50m –línea fina llena-, 100m –línea fina de trazos- y, 150m –en rojo-) y localidades mencionadas en el texto. Las líneas negras con flecha indican sentidos de circulación esquemática en verano inferidos de observaciones hidrográficas en el GSM (Piola y Scasso, 1988) y modelos numéricos de mayor extensión en la plataforma exterior. La línea gruesa gris indica la posición promedio del frente de Valdés (Sabattini and Martos, 2002). Las líneas horizontales A-A y B-B indican la ubicación de secciones transversales referidas en el texto (b) Gradientes de temperatura superficial para el mes de enero calculados de 18 años de datos satelitales Pathfinder (en °C/km). (modificado de Rivas, 2006).

2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

El modelo seleccionado para nuestro estudio es el Regional Ocean Model System (ROMS). Las ecuaciones del modelo y los algoritmos numéricos que utiliza para su resolución se hallan detallados en Shchepetkin and McWilliams (2005) y por lo tanto solo se presenta aquí un resumen. El modelo es tridimensional dependiente del tiempo y resuelve las ecuaciones primitivas en una grilla C de Arakawa. El modelo utiliza coordenadas sigma en la vertical (que siguen la topografía de fondo) y coordenadas curvilíneas en la horizontal (que permiten un mejor ajuste en las regiones costeras) y emplea un submodelo de clausura turbulenta para resolver la mezcla vertical en las capas superficial y de fondo. La mezcla horizontal se resuelve con un operador Laplaciano y un coeficiente de difusión que depende de los gradientes del flujo medio. Las ecuaciones gobernantes son resueltas junto con las condiciones de borde mediante métodos de diferencias finitas. Para lograr mayor eficiencia computacional en casos donde la propagación de ondas superficiales sea importante el modelo emplea una separación en dos modos, uno externo con paso de tiempo más pequeño y otro interno con paso de tiempo menos restrictivo. Para la resolución de la difusión vertical se emplea un esquema temporal semi-implícito. Entre las mejoras técnicas de ROMS frente a

modelos tradicionales se destacan: (i) empleo de un esquema temporal predictor-corrector tipo Adams-Moulton que amplía el rango de estabilidad por paso de tiempo, (ii) empleo de un esquema espacial sesgado de tercer orden para el operador advectivo que reduce la dispersión numérica y por lo tanto la necesidad de emplear excesiva difusión numérica horizontal; y (iii) reformulación del esquema de cálculo del gradiente de presiones horizontal en coordenadas sigma.

Para el presente trabajo se construyó el modelo en un dominio computacional que comprende desde los 43°30'S hasta los 40°30'S y desde los 65°30' W hasta los 61°50' W (Fig. 1a). La grilla curvilínea tiene una resolución de 1/50 de grado (unos 2 km de resolución media). En la vertical el modelo es discretizado en 15 capas sigma con menor espaciado en las capas de fondo y en la superficie para lograr una mejor representación de las capas límites. El paso de tiempo interno es de 360s. La topografía submarina se obtiene por interpolación bilineal de datos provistos por el Servicio de Hidrografía Naval. El modelo se inicializa con temperatura y salinidad uniforme en la horizontal y estructura vertical promediada anualmente de los datos de Conkwright et al., 2002. En la región de los Golfos Patagónicos, las mareas semidiurnas constituyen uno de los forzantes principales del océano y en particular la componente M_2 explica más del 80% de la varianza de energía cinética de las corrientes en la plataforma interna (Rivas, 1997). Para imponer la onda de marea en los bordes laterales del dominio computacional empleamos amplitudes y fases de elevación y velocidad en el borde abierto correspondientes a la componente lunar principal semidiurna (M_2) de nuestro modelo barotrópico (Tonini et al, 2006). Los vientos superficiales y flujos de calor estacionales se obtuvieron de bases de datos globales (COADS), (Da Silva et al., 1994) y fueron interpolados bilinealmente a la grilla numérica. El flujo de calor se parametriza siguiendo la formulación de Barnier et al. (1995). Hay tres bordes abiertos en los bordes laterales este, norte y sur donde se emplean las condiciones de radiación y relajación propuestas por Marchesiello et al. (2001). El modelo se integró por dos años con forzante climatológico estacional; en este trabajo se analizarán promedios mensuales correspondientes al verano (febrero).

3 RESULTADOS

3.1 Experimento Base

El experimento base fue diseñado para obtener la mejor reproducción de la circulación en la región de estudio. De esta manera se utilizó una topografía de fondo realista (Fig. 1a) y se forzó el modelo con la componente de marea M_2 en los bordes laterales y vientos y flujos de calor realistas (con variación espacial y temporal) en la superficie (EXP1).

La circulación general en los Golfos Norpatagónicos calculada por el modelo para un mes representativo de verano (febrero) se representa en la Fig. 2 por medio de la función de corriente, proporcional al transporte integrado en la vertical, y la velocidad en la capa superficial. Una característica dominante de la circulación en el GSM es la presencia de un pronunciado giro ciclónico (horario) que ocupa casi la totalidad del golfo (Fig 2a). El transporte medio del giro es de aproximadamente $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ y se divide a la altura de 41°S en dos áreas de recirculación ciclónica; una centrada cerca de 41°30' de unos 60km de diámetro y que transporta alrededor de $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ y otra al sur, de transporte similar y menores dimensiones centrado cerca de 42°S. Estos giros han sido identificados en trabajos previos mediante análisis de datos hidrográficos (Piola y Scasso, 1988) y modelos numéricos de baja

resolución (Beier y Akaprahamyan, 1991). El origen dinámico del giro ciclónico del GSM descansa como veremos en la interacción del campo de densidad, la topografía del fondo y la marea. En la costa sur del GSM aparecen además claramente delineados dos giros anticiclónicos (antihorarios) uno de mayor diámetro al sudoeste y otro más pequeño al norte de la Península Valdés. Un giro anticiclónico más débil domina la costa noroeste del golfo.

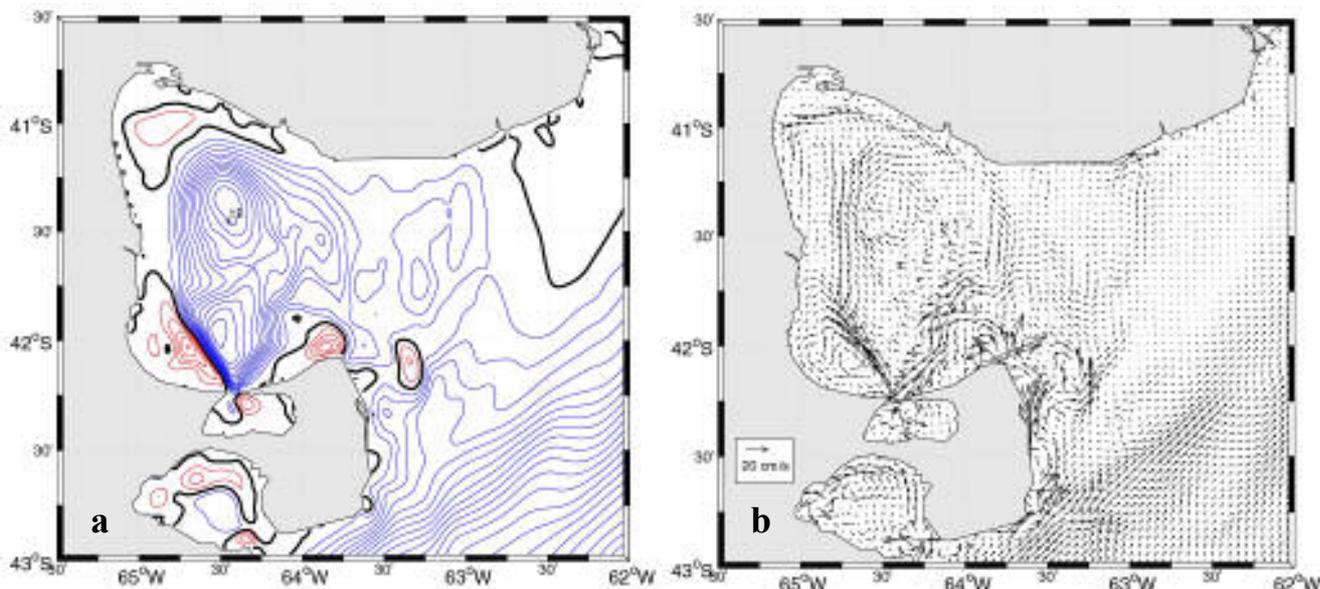


Figura 2. Resultados del experimento de control con topografía realista y forzante de mareas, vientos y flujos de calor (EXP1) para el mes de febrero (a) Función de corriente (Intervalo de contornos $IC=1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$). Colores rojos de contornos indican rotación anticiclónica (antihoraria), azules ciclónica (horaria). La línea negra indica el contorno cero (b) Vectores de velocidad de la corriente a los 5m de profundidad.

El campo de corrientes superficiales muestra características adicionales de la circulación horizontal (Fig. 2b). Se aprecia una intensa corriente (jet) hacia el norte concentrada a unos 30 km de la costa oeste del GSM; y una corriente de retorno más ancha hacia el sur cerca de la boca. El jet oeste presenta dos puntos de bifurcación, uno al norte, y otro al sur. Las ramas Oeste de ambos puntos de bifurcación alimentan una corriente costera de dirección sur, más bien débil, que se extiende desde aproximadamente 41°S , 63°W hasta la boca del golfo San José. Una parte del flujo de la rama Este genera un estrecho giro de recirculación centrado en $41^\circ 20'$, mientras que el resto alimenta la corriente de retorno de la boca. En su desplazamiento hacia el sur, esta corriente se ve retroalimentada con aguas de la plataforma exterior, principalmente provenientes del Sur de la Península Valdés. Las corrientes en la plataforma exterior presentan dos zonas bien definidas separadas por un jet intenso de dirección noreste que coincide aproximadamente con el FPV. Al sur del frente la circulación superficial sigue la dirección general de la circulación en plataforma, mientras que al norte la dirección de las corrientes se halla menos definida y la intensidad de las mismas disminuye. El cambio de velocidad a través del frente es del orden de 5 cm/s. Una intensa corriente costera rodea la Península Valdés, viéndose interrumpida en el Norte por la aparición de remolinos producto de la rectificación topográfica de la onda de marea sobre los bancos submarinos (Glorioso and Simpson, 1994; Tonini *et al*, 2006).

El panel superior de la Fig.3a muestra la distribución de temperatura modelada a través de una sección este-oeste (A-A) del GSM. Se observa una termoclina bastante intensa

($\sim 2^\circ\text{C}/10\text{m}$) y ubicada a los 20 m de profundidad, menos profunda que la reportada por Piola y Scasso (1988). Las isolíneas de temperatura se curvan hacia arriba en la costa oeste, posiblemente por efecto de afloramiento generado por el viento (predominantemente de dirección costa afuera); y hacia abajo cerca de la boca del Golfo, donde la interacción de la marea con la topografía de fondo homogeneiza la columna de agua. La Fig.3b muestra la componente norte de la velocidad a través de la misma sección. Se observa la existencia de un núcleo de velocidad del orden de los 10 cm/s hacia el norte y un flujo de retorno más ancho y de menor velocidad. El núcleo del flujo de retorno es sub-superficial. Se aprecia también la estructura vertical de la corriente costera subsuperficial de dirección sur.

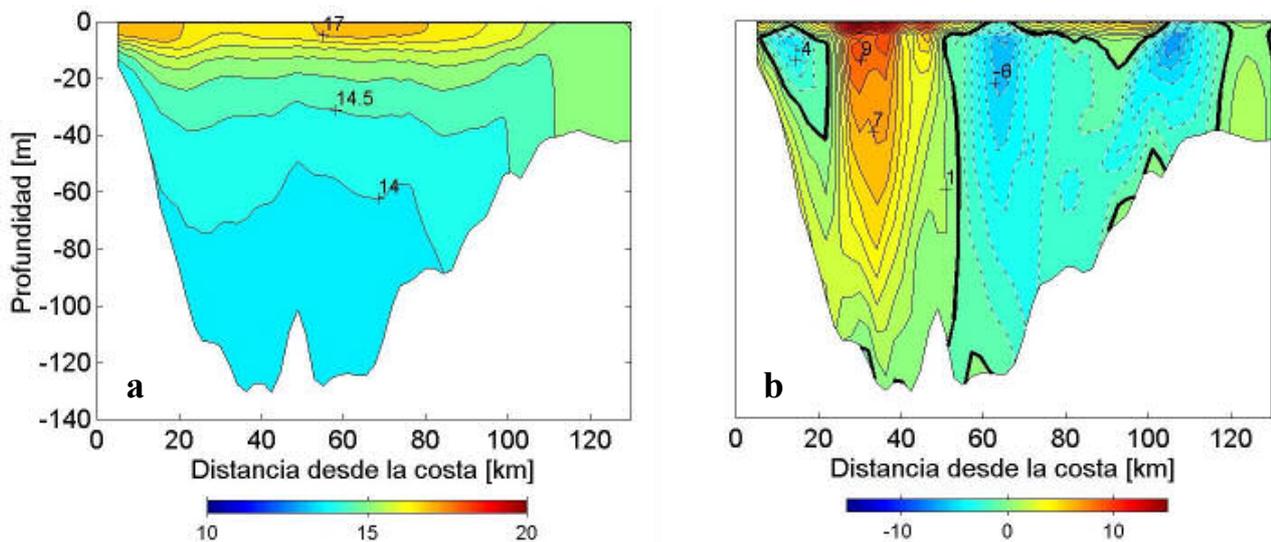


Figura 3. Corte transversal del GSM a la altura del giro ciclónico norte (Corte A-A en Fig. 1) correspondiente al EXP1. (a) Temperatura (IC: 0.5°C). (b) Velocidad transversal a la sección (IC: 1 cm/s). Las líneas llenas indican velocidad positiva (hacia el norte), las líneas a trazos velocidad negativa (hacia el sur).

La estructura del FPV se ilustra mediante la distribución horizontal de gradiente de temperatura y un corte vertical de temperatura (Fig. 4). El gradiente de temperatura superficial muestra una zona de alta intensidad de dirección NE en la plataforma exterior, en buena concordancia con observaciones satelitales (Fig. 1). Se aprecian además en la figura los frentes de la boca del GN (menos intenso) y de la boca del GSM. Los gradientes modelados, sin embargo, son más intensos que los observados. El corte vertical muestra que las isotermas que tienen una dirección horizontal en la termoclina divergen entrando a la zona bien mezclada (Fig. 4b). Las de mayor valor de temperatura tienen una pendiente hacia la superficie, las de menor valor hacia el fondo. Tanto en la superficie como en el fondo la región frontal se marca claramente como una zona de transición entre la zona oceánica, donde las isotermas están bien juntas al área costera donde la temperatura es casi uniforme. Las aguas superficiales son más frías en la zona mezclada y más calidas en la zona estratificada. La localización superficial del frente y su estructura vertical están en buena concordancia con observaciones remotas satelitales y mediciones hidrográficas (Rivas, 2006; Sabatini and Martos, 2002).

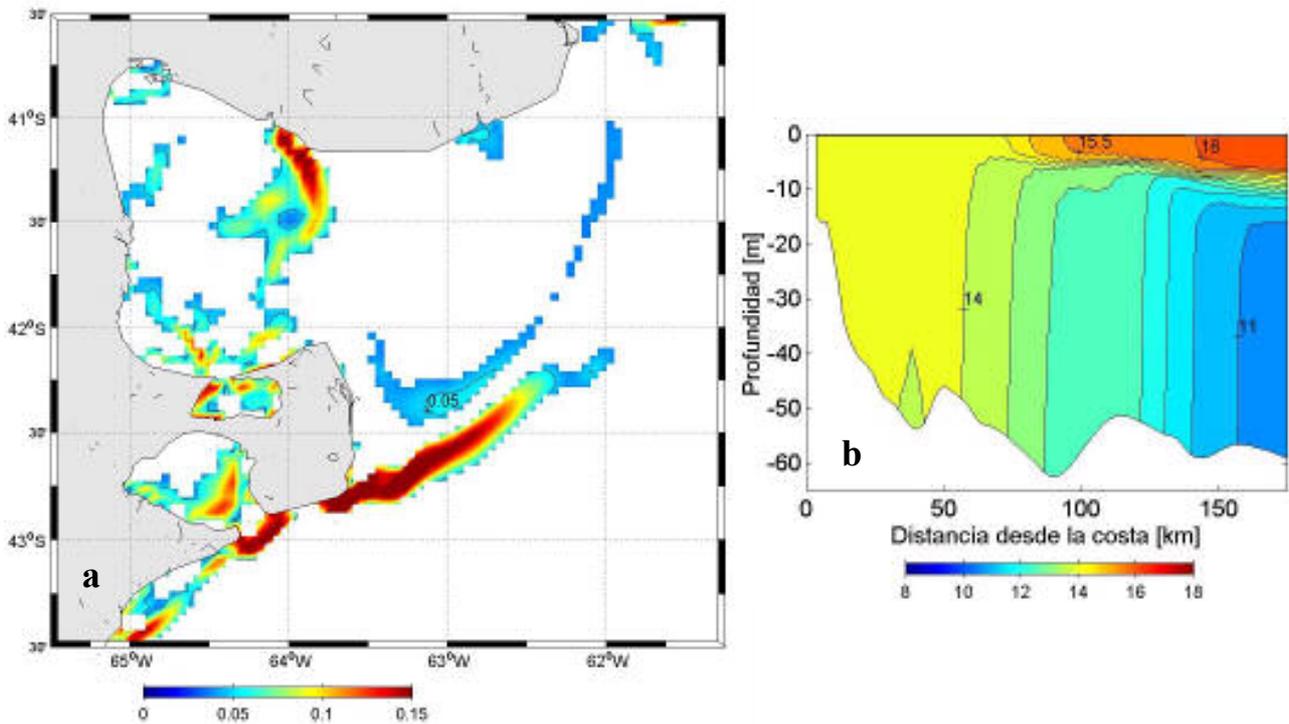


Figura 4. (a) Gradiente superficial de temperatura (en °C/km) para el mes de febrero construido con resultados del modelo numérico. (b) Sección transversal de Temperatura a la altura del frente de Valdés [(B-B) en Fig. 1].

3.2 Experimentos de sensibilidad.

El experimento de control (EXP1) ha revelado las características fundamentales de la circulación en la región de los Golfos. Con el objeto de cuantificar el efecto de los diversos factores ambientales que regulan la circulación en el GSM y el FPV y evaluar su contribución a la dinámica observada, se condujeron cuatro experimentos adicionales modificando sucesivamente el forzante, la topografía de fondo y la estratificación.

Sensibilidad al forzante.

Para evaluar la importancia relativa de la marea y el viento en la circulación, se condujeron dos experimentos. En el primero se excluye el forzante de marea (EXP2) y en el segundo se incluye la marea pero se duplica la intensidad del viento (EXP3). Las condiciones iniciales, el flujo de calor y humedad y el resto de los parámetros del modelo son iguales a los del EXP1. La respuesta del modelo para el EXP2 (sin marea) se muestra en la Fig.5 a través de la función de corriente. Es aparente el cambio sustancial en la circulación en el interior del GSM y en la plataforma exterior. En este caso la función de corriente muestra un giro anticiclónico muy intenso que domina la porción oeste del GSM y un giro horario más débil y conectado a la circulación exterior en el este. El flujo es aproximadamente uniforme en la plataforma exterior, sin evidencia de formación de zonas frontales. Este efecto se ve claramente ilustrado en la sección transversal a través del FPV, donde se aprecia un aumento uniforme en la penetración de la capa de mezcla superficial y la ausencia de la zona bien mezclada cerca de la costa (Fig. 5b).

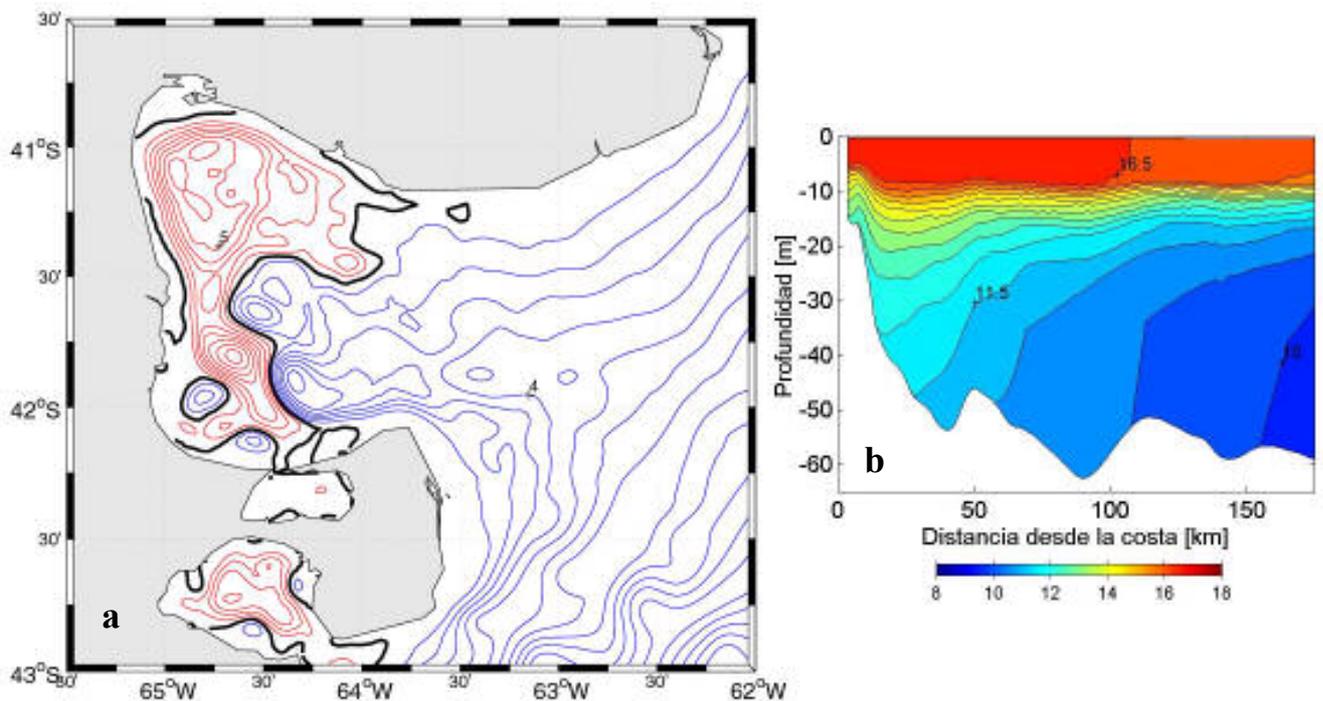


Figura 5. Resultados del experimento con topografía realista, forzante de vientos y flujos de calor y sin mareas (EXP2) para el mes de febrero (a) Función de corriente (Intervalo de contornos IC= 1×10^4 m³/s). Colores rojos de contornos indican rotación anticiclónica (antihoraria), azules ciclónica (horaria). La línea negra indica el contorno cero (b) Sección transversal de Temperatura a la altura del frente de Valdés (B-B) en Fig. 1.

La Fig. 6 muestra la respuesta del modelo para el EXP3 (con marea y doblando la intensidad del viento). En este caso los patrones de circulación son similares a los del caso base, sin embargo la intensidad y escala espacial de la respuesta se incrementa. Esta intensificación general de la circulación se aprecia en el aumento del transporte del giro norte de recirculación del GSM y su expansión hacia la costa norte. El jet costero es más rápido y más ancho. El subgiro antihorario de la costa sur también incrementa su magnitud aunque los giros antihorarios que bordean la Península Valdés permanecen con pocas variaciones. El FPV muestra una mayor penetración de la capa de mezcla y un movimiento de aguas afuera del frente. En la zona costera, el aumento de intensidad del viento incrementa la mezcla vertical, retirando el frente de aguas afuera. En la zona estratificada el incremento de la fricción vertical en la capa superficial intensifica la penetración de la termoclina comparado con el EXP1 (Fig. 6b).

Sensibilidad a la topografía.

Con el objeto de evaluar el efecto de la topografía de fondo se condujo un experimento simple (EXP4) con el mismo forzante, inicialización y parámetros del EXP1 pero donde la profundidad del dominio se fija constante e igual a 100 m. La Fig. 7a muestra la función de corriente resultante. El efecto fundamental que provoca la uniformidad y profundidad de la topografía submarina es una drástica reducción de la energía de disipación generada por la marea. Esta reducción tiene efectos dinámicos evidentes sobre la circulación oceánica. Hay ahora un solo giro ciclónico muy débil en el GSM y una intensificación de la circulación de dirección noreste en la plataforma exterior forzada principalmente por el viento (comparar con Fig. 2a). La estructura vertical de temperatura a la altura del FPV muestra una estratificación

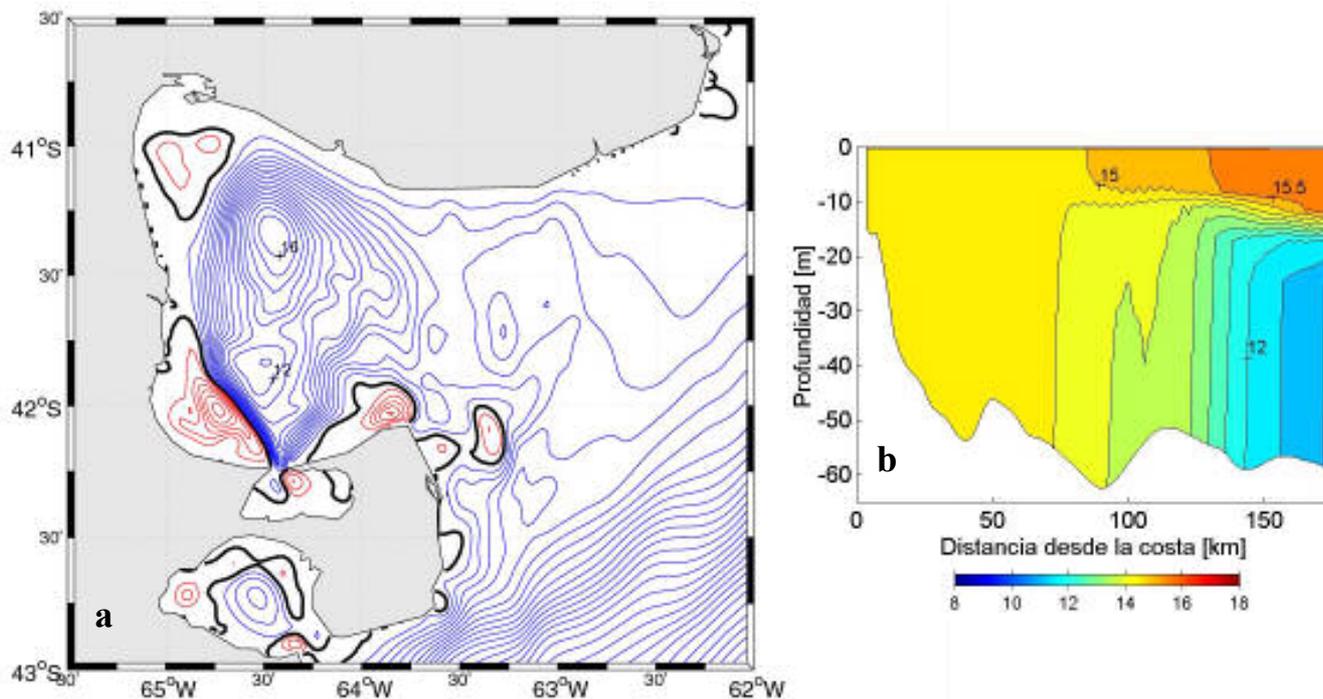


Figura 6. Resultados del experimento con topografía realista, forzante de marea y flujos de calor y doblando la intensidad del viento (EXP3) para el mes de febrero (a) Función de corriente (Intervalo de contornos $IC=1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$). Colores rojos de contornos indican rotación anticiclónica (antihoraria), azules ciclónica (horaria). La línea negra indica el contorno cero (b) Sección transversal de Temperatura a la altura del frente de Valdés (B-B) en Fig. 1.

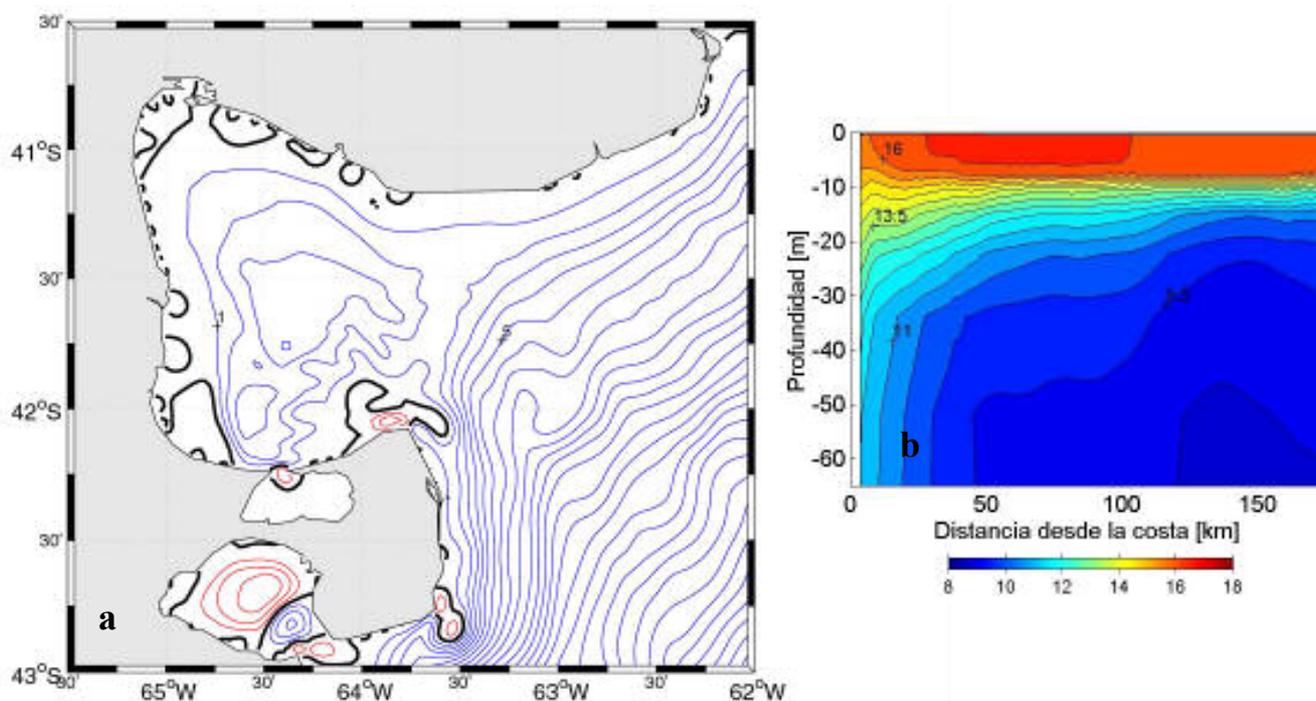


Figura 7. Resultados del experimento con topografía constante (100m), forzante de vientos, flujos de calor y marea (EXP4) para el mes de febrero (a) Función de corriente (Intervalo de contornos $IC=1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$). Colores rojos de contornos indican rotación anticiclónica (antihoraria), azules ciclónica (horaria). La línea negra indica el contorno cero (b) Sección transversal de Temperatura a la altura del frente de Valdés (B-B) en Fig. 1.

relativamente uniforme, desaparece la zona costera bien mezclada y es reemplazada por una zona de downwelling (isotermas que se curvan hacia abajo)(Fig. 7b). Al norte de la Península Valdés persiste un giro antihorario similar, aunque más débil, al obtenido en el EXP1. Posiblemente su origen esté relacionado con la interacción de la línea de costa con la marea.

Sensibilidad a la estratificación

Finalmente, se realizó un experimento para evaluar la contribución de la estratificación en la circulación media en los golfos. En este experimento la temperatura y salinidad se fijan en un valor constante y se eliminan los flujos de calor y humedad en la superficie (experimento barotrópico, EXP5). Se mantiene el mismo forzante de mareas y vientos. La Fig. 8 muestra la función de corriente resultante. La intensidad del giro ciclónico del GSM ha disminuído considerablemente comparado con el EXP1 y sus contornos se hallan poco definidos. En la zona sur, sin embargo, la circulación presenta características similares al caso estratificado. La estructura del giro ciclónico cerca de la boca del Golfo San José y de los giros anticiclónicos del norte de la PV se hallan claramente delineados. Estas estructuras se generan principalmente por rectificación topográfica de la onda de marea. El flujo en la plataforma exterior también es mucho menos intenso comparado con el caso estratificado.

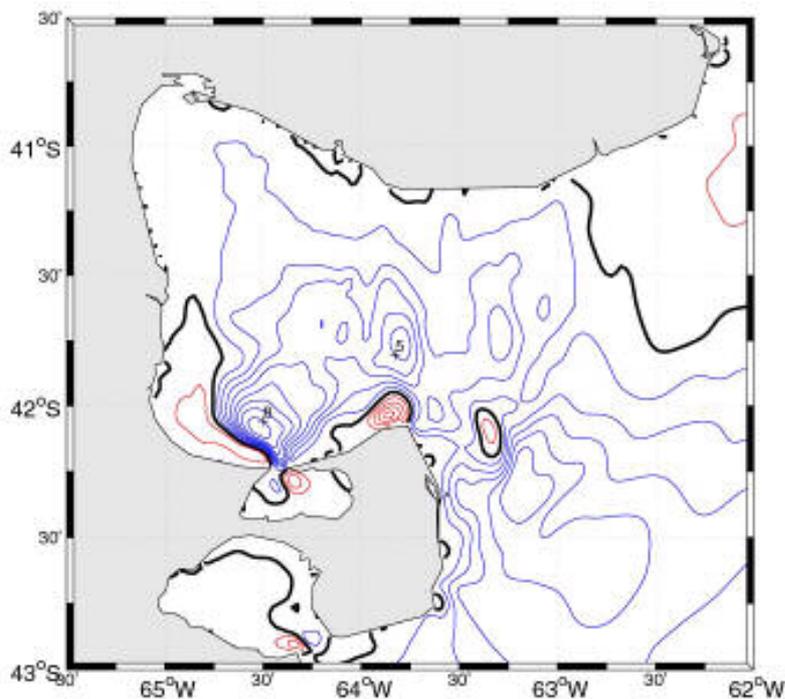


Figura 8. Resultados del experimento con topografía realista, forzante de vientos y marea e inicializado con temperatura y salinidad constantes (experimento barotrópico, EXP5) para el mes de febrero Función de corriente (Intervalo de contornos $IC=1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$). Colores rojos de contornos indican rotación anticiclónica (antihoraria), azules ciclónica (horaria). La línea negra indica el contorno cero.

4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo empleamos un modelo tridimensional no lineal de los Golfos Norpatagónicos en un dominio con topografía realista para examinar la influencia de la marea, la estratificación, el flujo de calor y el efecto del viento sobre la circulación y dinámica oceánica en el GSM y el FPV durante el verano. Basados en los resultados del modelo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1) La intensidad del giro ciclónico central del GSM se halla regulada por la interacción de la marea con la estratificación (mantenida por el flujo de calor y humedad superficial) en presencia de topografía variable. La topografía de fondo juega un papel fundamental, generando a través del incremento de la mezcla vertical forzado por la marea, las variaciones horizontales de densidad necesarias para inducir la formación y el aumento de intensidad del giro durante el verano. Los patrones de flujo obtenidos en el experimento con todos los forzantes y topografía realista (EXP1) son cualitativamente consistentes con los resultados previos sobre la circulación en el GSM basados en el estudio de propiedades hidrográficas (Piola y Scaso, 1998) y modelos previos de baja resolución (Beier y Akaprahamyan, 1991). Los giros anticiclónicos de la costa sudeste y noreste del GSM se hallan principalmente regulados por la acción del viento. Los giros anticiclónicos al norte y al sur de la Península Valdés y la intensificación del giro ciclónico del sur del GSM se generan mayormente por rectificación topográfica de la onda de marea. Sin estratificación vertical (EXP5) la interacción de la marea con la topografía y el viento superficial generan una circulación general mucho más débil en el interior del GSM. Sin variaciones topográficas (EXP4) la energía de la marea no es suficiente para inducir variaciones de densidad dinámicamente relevantes y la circulación es similar al caso no estratificado.

2) La formación del frente térmico de Península Valdés está regulada por la acción de la marea en presencia de variaciones en la topografía del fondo. Cambios en la intensidad del viento producen una profundización de la termoclina y un corrimiento del frente aguas afuera. La estructura modelada del frente de Valdés es similar a la reportada en Sabbatini and Martos (2002) aunque la profundidad de la termoclina es menor que la estimada de mediciones *in-situ*. Los mismos autores muestran que el frente de PV está sujeto a importantes variaciones interanuales. En 1998 por ejemplo, en la zona estratificada del frente se profundizó la termoclina, mientras que el límite de la zona bien mezclada se desplazó aguas afuera. Los resultados del EXP3 (aumento de la intensidad del viento) muestran que esta variabilidad interanual podría estar relacionada con cambios en la intensidad de los vientos.

Los resultados descriptos muestran estructuras robustas y en cierta medida consistentes con las (escasas) observaciones en el área de estudio. La ubicación y sentido de circulación de los giros del GSM y la generación y mantenimiento del frente de PV parecen ser explicados cualitativamente por los procesos físicos presentes en el EXP1 y considerados individualmente en los experimentos de sensibilidad. Sin embargo, las estimaciones del transporte del giro del GSM deben tomarse con precaución hasta la obtención de mediciones directas (corrientes) que validen los resultados. Asimismo, la existencia de una termoclina de poca profundidad (comparado con las observaciones) en la zona estratificada del frente de PV requiere un estudio más detallado. Algunos de los parámetros que pueden influenciar este resultado son la resolución vertical y deficiencias propias de las bases de datos globales sobre intensidad del viento y del flujo de calor superficial, los cuales regulan la penetración vertical de la termoclina. Claramente se requiere mayor experimentación numérica para clarificar el papel de cada uno de estos factores. Estos experimentos se hallan en realización.

5 REFERENCIAS

- Acha, E.M., Mianzan, W.H., Guerrero R.A., Favero, M. and Bava, J., Marine Fronts and the continental shelves of Austral South America, Physical and ecological processes. *Journal of Marine Systems*, 44: 83-105, 2004.
- Barnier, B., L. Siefried, and P. Marchesiello, Thermal forcing for a global ocean circulation model using a three-year climatology of ECMWF analyses. *Journal of Marine Systems*, 6: 363-380, 1995.
- Beier, E.J. y Akaprahamyan, R., Variación estacional de la circulación inducida por el viento en el Golfo San Matías aplicando el modelo Cox/CIMA. *Resúmenes de las Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar 1989*, Puerto Madryn (Argentina), 109, 1991.
- Carreto J.I., C.A. Verona, A.B. Casal and M.A. Laborde, Fitoplancton, pigmentos y condiciones ecológicas del golfo San Matías III. *Instituto de Biología Marina de Mar del Plata, Informe N° 10*. Contribución 237, CIC pcia. de Buenos Aires, 10: 49-76, 1974.
- Conkright, M.E., R.A. Locarnini, H.E. Garcia, T.D. O'Brien, T.P. Boyer, C. Stephens, J.I. Antonov, 2002. *World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures*, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 17 pp, 2002.
- Da Silva, A.M., Young, C.C., Levitus, S, *Atlas of surface marine data 1994, Vol. 1, algorithms and procedures*, NOAA Atlas NESDIS 6, U. S. Department of Commerce, NOAA, NESDIS, USA, 74 pp, 1994.
- Glorioso, P. D., and R. A. Simpson, Numerical modelling of the M2 tide on the northern Patagonian Shelf. *Cont. Shelf Res.*, 14:267-278, 1994.,
- Marchesiello, P., J. C. McWilliams, and A. Shchepetkin, Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling.*, 3:1-20, 2001.
- Mazio, C. A. , Walter C. Dragani, Fernando J. Caviglia, and Jorge L. Pousab, Tidal Hydrodynamics in Golfo Nuevo, Argentina, and the Adjacent Continental Shelf. *Journal of Coastal Research*, 20 (4): 1000-1011, 2004.
- Palma, E. D, Tidal Flow and Tidal Energy in Valdés Península. *Revista Geofísica (México)* (1): 31-50, 2002
- Piola A.R. y Scasso L. M., Circulación en el Golfo San Matías. *Geoacta*, 15 (1): 33-51, 1988.
- Rivas, A. L. , Corrientes originadas por la acción del viento y la marea en el Golfo Nuevo. *Geoacta*, 16: 185-205, 1989.
- Rivas, A. L., Current meter observations in the Argentine continental shelf. *Cont. Shelf Res.*, 17 : 391-406, 1997.
- Rivas, A. L., Quantitative estimation of the influence of surface thermal fronts over chlorophyll concentration at the Patagonian shelf. *Journal of Marine Systems* 63 : 183-190, 2006.
- Sabatini, M., Martos, P., Mesozooplankton features in a frontal area off northern Patagonia (Argentina) during spring 1995 and 1998. *Scientia Marina* 66 (3): 215-232, 2002.
- Tonini, M, E. D. Palma, and A. Rivas, Modelo de alta resolución de los Golfos Patagónicos. en *Mecánica Computacional XXV*, Cardona, Nigro, Sonzogni y Storti Eds, AMCA, Santa Fé, 25: 1464-1479, 2006.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C., The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling* , 9 :347-404, 2005.