

CIRCULACIÓN RESIDUAL Y VORTICIDAD MAREAL EN LOS GOLFOS NORPATAGÓNICOS

Mariano H. Tonini, Elbio D. Palma

*Instituto Argentino de Oceanografía, CONICET
(8000) Bahía Blanca, Argentina (e-mail: mtonini@criba.edu.ar)
Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur y CONICET.
(8000) Bahía Blanca, Argentina (e-mail: uspalma@criba.edu.ar)*

Palabras Clave: Simulación numérica, circulación residual, cuadrupolos, energía mareal, vorticidad.

Resúmen. En este trabajo empleamos un modelo numérico de alta resolución para estudiar los flujos de energía, disipación y flujos residuales generados por la marea en la región. Las amplitudes y fases de la onda de marea y las velocidades (elipses de marea) modeladas concuerdan con mediciones de tablas de marea y las escasas observaciones de corrientes disponibles. De la totalidad de la energía mareal que entra por el borde sur del dominio, una porción pequeña ingresa al Golfo Nuevo (GN) siguiendo el resto en dirección norte y penetrando por el sector sur de la boca del GSM. La disipación no es uniforme, y se concentra básicamente en las zonas de topografía altamente variable como son las bocas de los golfos GN, Golfo San José (GSJ) y GSM, en especial en la zona Norte de Península Valdés. La marea puede producir corrientes residuales por interacción no-lineal en presencia de topografía variable, tanto en variaciones bruscas de topografía de fondo como en la línea de costa. La circulación residual generada por la marea está compuesta de tres patrones básicos: a) Giros horarios generales en el interior del GN y GSM, b) giros topográficos menores sobre bancos, pozos y c) cuadrupolos ubicados en la boca de los GN y Golfo San José (GSJ) y dipolos alrededor de promontorios. La formación de estos giros se produce por interacción no-lineal del flujo oscilatorio con la geomorfología del lugar y la rotación terrestre, la cual es luego transferida al flujo medio (residual). Las características dinámicas de estos tres patrones son analizadas por medio de balances de vorticidad. El balance de vorticidad media es entre el término advectivo y la fricción de fondo, siendo la principal fuente de producción de vorticidad para el caso "a" la advección y la fricción por pendiente de la topografía del fondo, para el caso "b" la fricción de fondo en presencia de topografía variable y en "c" la producción de vorticidad por variación brusca de la línea de costa (generándose aún con topografía constante). Los resultados del modelo son consistentes con trabajos previos y configuraciones similares estudiadas en dominios idealizados.

1. INTRODUCCION

La región de los Golfos Norpatagónicos (Fig.1) constituye uno de los ecosistemas marinos más importantes del Mar Argentino. Tanto el reservorio de flora y fauna costera como los recursos pesqueros (comerciales y artesanales) han captado la atención y el apoyo económico de organizaciones internacionales vinculadas a la conservación y al cuidado del medio ambiente. Una característica dinámica única de la región es la gran amplitud de la marea semidiurna (M_2), que se incrementa de 1.00 m en la región de plataforma interior a más de 3.00m en el norte del Golfo San Matías (GSM). Muchas características y efectos dinámicos producidos por el forzante de marea prevalecen y/o influyen notablemente en la circulación, tanto barotrópica como baroclínica, por lo que es preciso determinar con la mayor exactitud posible los procesos inducidos por este forzante. La marea puede producir corrientes residuales por interacción no-lineal en presencia de topografía variable, tanto en variaciones bruscas de topografía de fondo como en la línea de costa (Robinson, 1981, 1983). Pingree (1978) examinó en detalle el mecanismo por el cual se forman fuertes giros residuales (vórtices) en las cercanías de una península o promontorio y expuso que la mecánica de estos giros puede ser interpretada en términos de vorticidad, la cual es formada por corrientes oscilatorias y transferida por dinámica no-lineal al flujo medio (residual). Según Zimmerman (1981) el flujo residual de marea en mar abierto es inducido por advección no-lineal de la vorticidad producida por estiramiento y contracción de la columna de agua y el rotor de la fricción de fondo sobre una topografía de fondo irregular.

En este trabajo se emplean modelos numéricos tridimensionales realistas e idealizados de alta resolución para estudiar los flujos de energía, disipación y flujos residuales generados por la marea en la región.

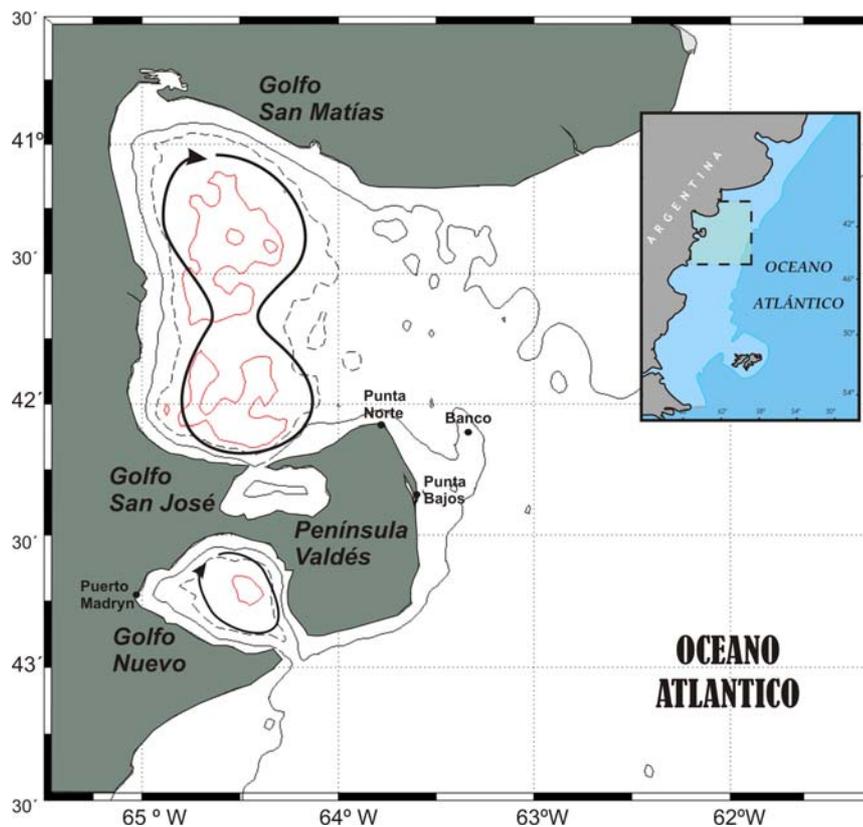


Figura 1. Area de estudio y ubicación de los giros ciclónicos. En el interior se indican isobatas de 50 (línea negra llena), 100 (línea negra punteada) y 150 m (línea roja)

2. CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

2.1 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.

2.2 Configuración del modelo y experimentos numéricos

Para el presente trabajo se construyó el modelo realista en un dominio computacional tridimensional que comprende 3 grados en latitud y 5.5 grados en longitud. La discretización espacial posee variación telescópica en orden creciente de Sur a Norte y de Este a Oeste, siendo la mayor resolución cercana a 1 km en la zona de los golfos Norpatagónicos. La discretización vertical es de 20 niveles sigma. Las capas sigma tienen menor espaciamiento 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 300s. El modelo es barotrópico (sin variación de densidad) y está forzado por seis componentes principales de marea en los bordes abiertos. Hay tres bordes abiertos en los bordes laterales este, norte y sur, donde se aplican las condiciones de borde propuestas por [Marchesiello et al. \(2001\)](#).

Los experimentos con configuración realista son los siguientes: Experimento de Control; experimento con profundidad constante (hco 100), experimento sin el término de Coriolis en las ecuaciones de momento (no-cor); y por último un experimento sin el término de advección en las ecuaciones de momento (no-adv). Adicionalmente se llevaron a cabo una serie de experimentos idealizados con el fin de aislar las características dinámicas mostradas por el modelo realista y fundamentar los mecanismos responsables de formación de los giros. La batimetría realista de los golfos se aproxima con buena exactitud con formas geométricas sencillas.

3. RESULTADOS

3.1 Cartas Cotidales e Isoamplitudes de la componente semidiurna M2

La amplitud y fase de la componente semidiurna M2 fueron derivadas de un análisis armónico de datos horarios de elevaciones de la superficie libre y de componentes de la velocidad tomadas del modelo numérico construyéndose luego las cartas de cotidales e isoamplitudes y gráficos de elipses de marea.

La onda de marea ingresa al dominio desde el Sur y se propaga hacia el noroeste sobre la plataforma patagónica como una onda costera de Kelvin con la amplitud creciendo hacia la costa (Fig. 2a). El sistema anfidrómico para esta componente está compuesto de dos anfidromos. Uno ubicado en $41^{\circ} 30'S$ y $61^{\circ}W$, frente al GSM y detectados por trabajos previos en sectores más costeros (Tonini, et al. 2006) y el otro desplazado más al Sur localizado aproximadamente en $47^{\circ}S$, $62^{\circ}W$, el cual no alcanzamos a visualizar en el dominio analizado, pero se puede observar en trabajos de dominios más extensos (Tonini, et al. 2006; Glorioso and Flather 1997). La amplitud de la onda presenta considerable variación espacial, con rangos que van desde 1.80 en la boca del GSM a más de tres metros en el noroeste del GSM. La onda de Kelvin pierde gran parte de su energía luego de ingresar al GSM y por lo tanto más hacia el norte las amplitudes costeras se reducen considerablemente (menos de 50 cm. cerca de la desembocadura del Río Negro). El Golfo Nuevo, presenta una restricción menor a la del GSM. La variación de amplitudes va desde 150 cm en la boca a 185 en la zona de Puerto Madryn (en concordancia con mediciones de Hidrografía Naval). El GSJ, debido a sus reducidas dimensiones y las restricciones que presenta la zona de intercambio con el GSM, las amplitudes alcanzadas son cercanas a los 3 metros, sin gran variación de amplitud entre la boca y los extremos.

La distribución espacial de cotidales e isoamplitudes es similar a la obtenida con modelos de menor resolución (Glorioso and Flather 1997, Simionato et al 2004). Cuando se comparan los valores de la simulación numérica con datos observados en estaciones costeras, el resultado es muy bueno en elevaciones (menor a 5cm, $\sim 1.5\%$) y fases (menor a 20°) (Fig. 2a).

Un flujo cuasi rectilíneo puede apreciarse cerca de la entrada del GSM (Fig. 2b) donde se encuentran las corrientes más intensas (~ 2 cm/s). En el interior del GSM, en las zonas profundas, el patrón de las elipses es más circular. Los vectores velocidad rotan en forma horaria en casi toda la región, con la excepción del NE de Península de Valdés donde las corrientes son más intensas. En el GN las velocidades tienen aproximadamente un orden de magnitud menor, con máximos en el interior de 0.2 cm/s. La distribución de elipses dentro del golfo es de sentido casi completamente horario, a excepción de la zona Sur de la boca donde el sentido de circulación es antihorario. El patrón de elipses es rectilíneo en general con grandes amplificaciones en la zona de la boca.

El GSJ presenta un dominio antihorario en la zona de la boca y centro del golfo, mientras que en las costas Este y Oeste el dominio es horario. Fuera de la zona de la boca las elipses son débiles al igual que en el GN con valores entre 0.3 y 0.5 cm/s. El patrón de las elipses es más circular en la zona central y se hace más rectilíneo hacia las costas mientras que disminuye en magnitud.

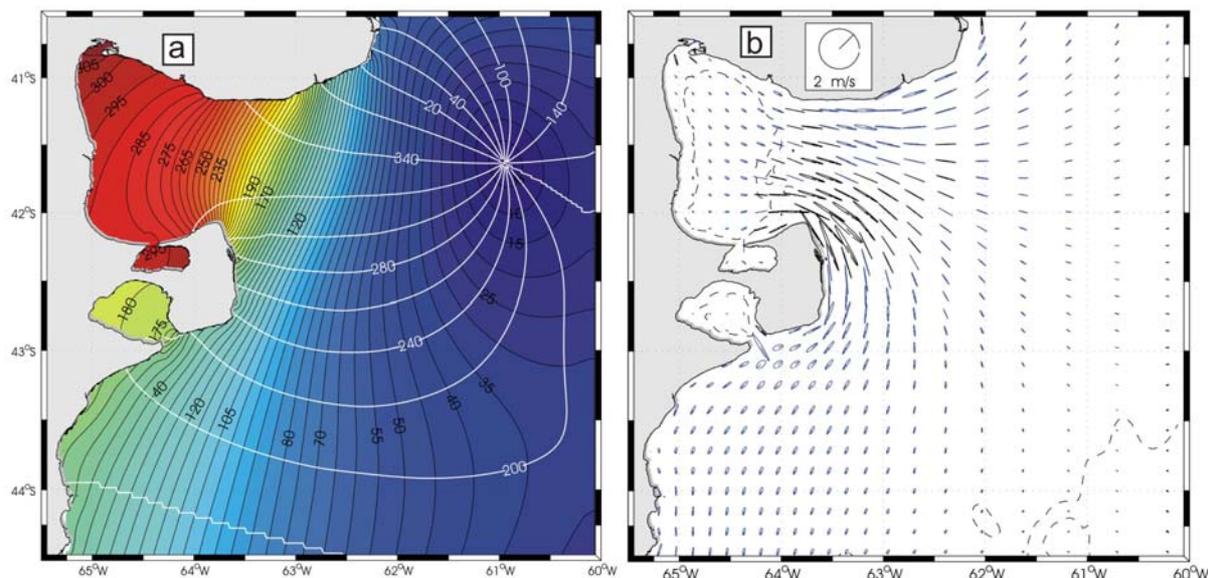


Figura 2. Análisis de la componente M2. a) Líneas cotidales (líneas blancas, IC= 20°) y de elevaciones (líneas negras, IC=5cm). b) Elipses de marea. Color azul denota giro ciclónico y negro anticiclónico.

3.2 Disipación y flujos de Energía

Según Palma et al. (2004) un gran porcentaje del volumen de disipación de energía de la Plataforma Patagónica se produce al sur de la latitud 40° S y se concentra en zonas costeras aledañas a Península Valdés. La disipación media de energía mareal por unidad de área se puede calcular de la expresión de Davies et al. (1985):

$$Q_E = Cd \rho N^{-1} \sum [u^2_{(i,j)} + v^2_{(i,j)}]^{3/2} [W/m^2] \quad (1)$$

Donde Q_E es la disipación de energía por unidad de área, Cd es el coeficiente de arrastre y es igual a $2.5e-3$, N es el número de iteraciones de la sumatoria corresponde a los pasos numéricos que fue simulado el modelo hasta la estabilización del mismo (para nuestro caso $N = 21600$) y (u, v) son las componentes de velocidad media para cada punto de grilla en la capa de fondo.

En nuestro caso, analizaremos la disipación de energía para la componente M2.

La figura 3a muestra la distribución de disipación de energía calculada a partir de las velocidades de la capa de fondo para la componente M2. La mayor parte del dominio presenta valores reducidos, pero por otro lado está altamente concentrado en el sector E y N de PV con valores muy elevados mayores a $16 W/m^2$. A su vez, las bocas del GN y GSJ presentan una gran disipación focalizada en el sector de intercambio. Estos resultados, denotan la pérdida de energía en el sector de intercambio de flujo en las bocas. Estas características fueron encontradas también en trabajos previos (Glorioso y Simpson, 1994). En el sector Este de Península Valdés, encontramos dos centros de disipación de energía bien marcados. El primero y más intenso al Este de la Albufera existente cercano a Punta Bajos, donde las disipaciones alcanzan valores de más de $15 W/m^2$ y se extiende hasta alcanzar Punta Norte y hacia el Este hasta alcanzar el banco de 30 metros de profundidad. El otro centro, menos intenso, se visualiza cercano a Punta Delgada hacia el Norte y su área de influencia es menor al primer centro mencionado. Aparecen también, zonas de alta disipación, aunque no tan intensas como las de PV, como ser la boca del Golfo Nuevo ($>3W/m^2$) y la boca del GSJ ($>1W/m^2$).

Para el cálculo de los flujos de energía (M2) se utilizó la expresión utilizada por [Glorioso and Flather \(1997\)](#):

$$Fe = 0.5 [\rho g D \eta_0 U_0 (\varphi_{\eta_0} - \varphi_{U_0})] \quad [\text{watts} / \text{m}] \quad (2)$$

Donde: Fe es el flujo de energía, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, D es la profundidad en metros, η_0 y U_0 son la elevación de la superficie libre y la velocidad correspondiente a la componente analizada y $(\varphi_{\eta_0}, \varphi_{U_0})$ son las fases de elevación y velocidad respectivamente.

En la figura 3b se muestra el flujo de energía de la componente M2 de marea para el dominio de la simulación. Esta componente es la más importante en el flujo de energía mareal en la región, ya que es la que presenta las mayores magnitudes. En el área circundante a Península Valdés las velocidades son muy altas y el flujo de energía alcanza valores de $7e5$ W/m. Los flujos de energía más importantes se observan en la zona costera y disminuyen a medida que nos desplazamos hacia aguas de la plataforma (Fig. 3b).

El flujo de energía ingresa desde el Sur al golfo San Matías bordeando la costa y egresa con una magnitud de energía muy inferior. Lo que nos induce a pensar, que la disipación de energía dentro de los golfos y en Península Valdés es importante, reduciendo el flujo de energía que continúa hacia el norte de la plataforma ($\sim 7\%$ del total) (Fig. 3b). Otros trabajos hacen mención a la disipación de energía de los golfos norpatagónicos con buena aproximación a los resultados de nuestro modelo ([Glorioso y Simpson. 1994](#), [Glorioso and Flather, 1997](#)).

Los patrones de circulación para el flujo de energía de la componente M2 muestran un giro ciclónico (horario) abierto en borde Este, que domina todo el golfo San Matías, con flujos que ingresan desde el Sur de la boca y flujos que egresan por la zona Norte del GSM.

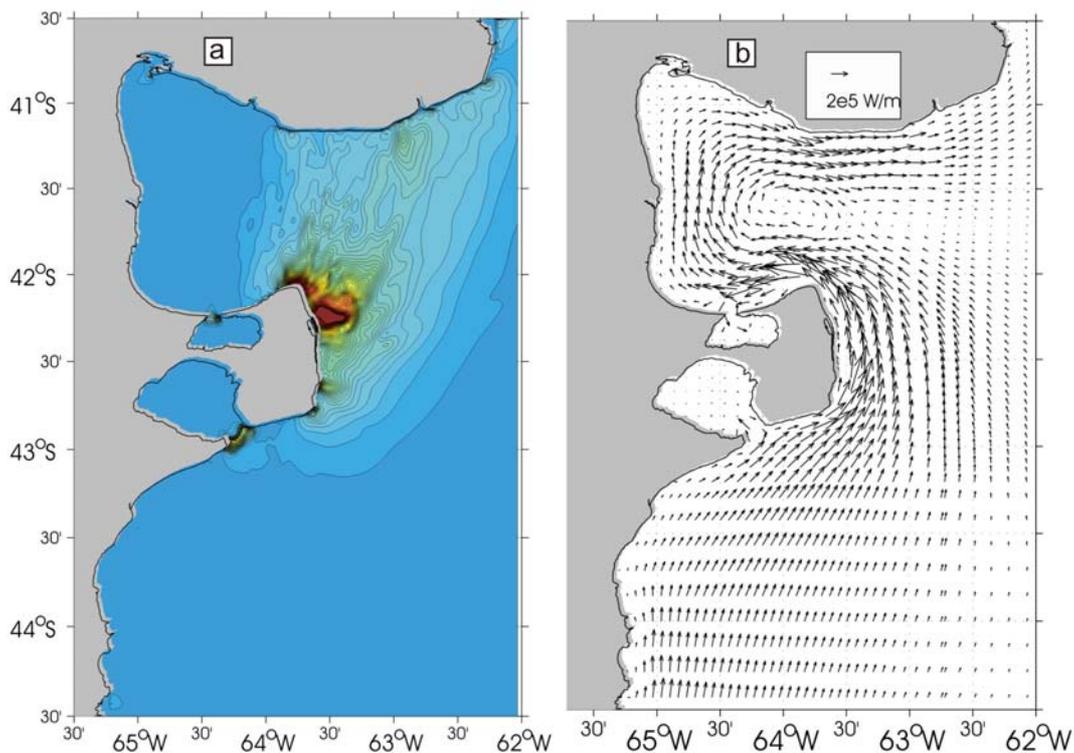


Figura 3. Análisis energético componente M2. a) Disipación de Energía. Los colores rojos indican los máximos. b) Flujo de energía.

3.3 Corrientes residuales de marea

3.3.1. Experimento de Control.

Incluido en el flujo periódico de la marea se halla el movimiento neto del agua conocido como circulación residual, cuya magnitud es generalmente menor al de las corrientes de marea. Aquí definimos la corriente residual como el promedio euleriano de las corrientes instantáneas (Robinson, 1983). El principal agente responsable de este flujo residual es la interacción no-lineal del flujo oscilatorio con la topografía irregular del fondo, la geometría costera y la fricción de fondo. La Figura 4a muestra las corrientes eulerianas residuales y la función corriente asociada calculadas en el experimento de control, luego de un promedio de 60 días. Al norte de Península Valdés (Fig. 4b) se observan intensas corrientes residuales (~30 cm/seg) que forman giros de recirculación horarios y antihorarios. Este resultado es consistente con resultados de simulaciones previas en la región (Glorioso and Simpson, 1994). Los giros son producidos por rectificación topográfica de la onda de marea (Park and Wang, 1994) y el sentido de giro es tal que dejan las regiones menos profundas a la izquierda, lo cual es consistente con resultados teóricos y numéricos previos de circulación en bancos de regiones macromareales (Lynch and Naimie, 1993).

Con la excepción de datos de corrientes de corta duración existe poca evidencia observacional directa que confirme las magnitudes o los patrones de corrientes residuales. Las corrientes residuales muestran un dominio principalmente horario en la mayor parte de la región. El GSM, presenta los máximos de transporte, 0.08 Sv ($1\text{Sv} = 1 \times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$) en la zona Sur cercano a la boca del GSJ en un giro ciclónico definido. El resto del dominio del GSM es horario y de menor intensidad. Al Norte de PV, sobre la costa, se genera un giro de pequeñas dimensiones y muy intenso (0.03 Sv) de sentido antihorario. Al Noreste de PV se observa otro giro de dimensiones similares al del Norte, pero mas débil (0.01 Sv). En la boca del Golfo Nuevo y San José, se observan estructuras de cuadrupolos que dominan la dinámica en el intercambio de ambos. Estas estructuras son muy intensas y definidas y serán analizadas mediante el balance de vorticidad.

El GN, se encuentra dominado por circulación horaria con transportes máximos de 0.05 Sv con una distribución similar a la descrita por la batimetría del golfo, en concordancia con lo descrito por Rivas (1989). El GSJ, muestra una dinámica dividida zonalmente y gobernada por el dipolo interior existente en la boca. La zona Este, dominada por un giro antihorario (0.025 Sv), que se debilita hacia las costas. La zona Oeste, dominada por circulación horaria de menor intensidad.

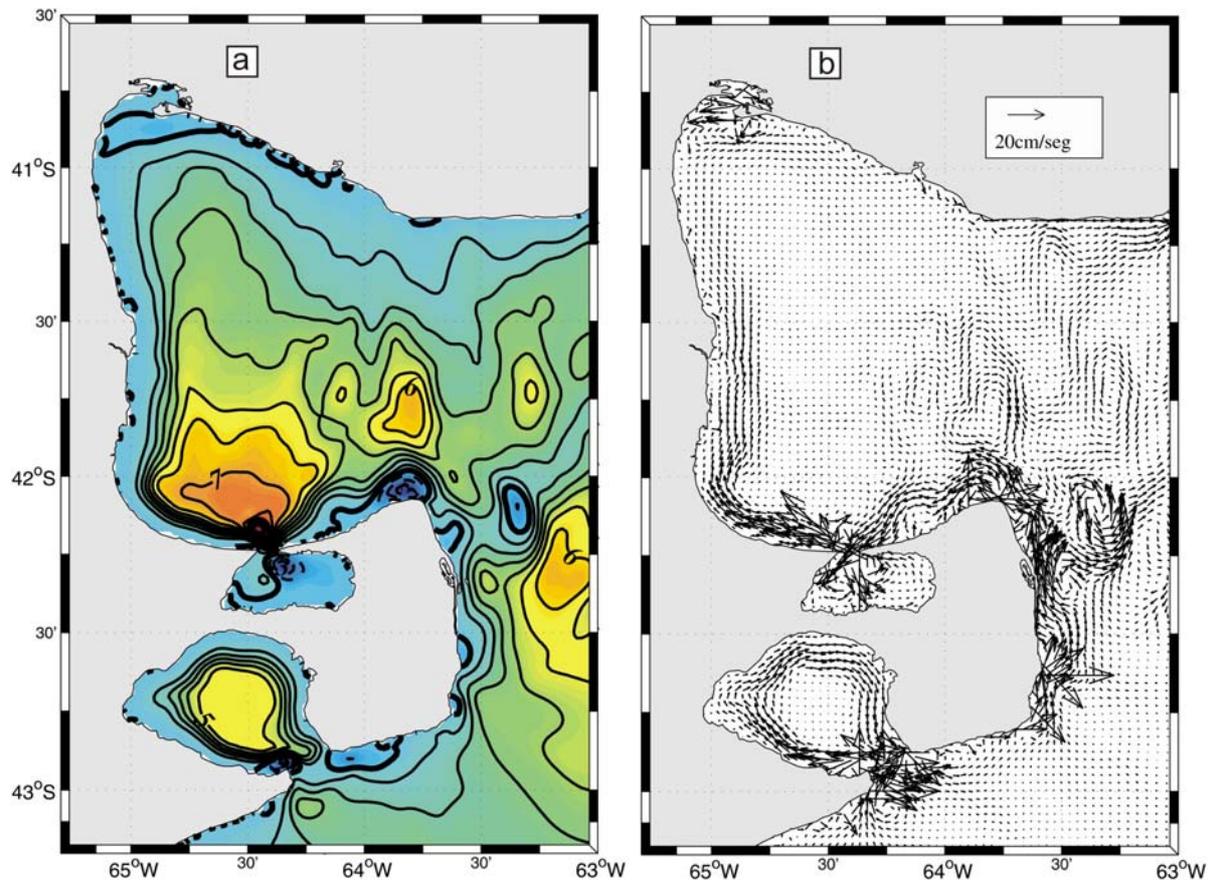


Figura 4. Corrientes residuales de marea. a) Función corriente. Línea llena indica circulación horaria y línea cortada circulación antihoraria. ($IC=0.01$ Sv). b) Vectores velocidad de las corrientes residuales medias.

3.3.2 Experimentos idealizados

Con el objeto de analizar con más detalle la generación de las estructuras residuales observadas en el modelo realista se realizaron un conjunto de experimentos adicionales. En esta sección se analizan experimentos idealizados y los balances de vorticidad, en la sección siguiente se analizan experimentos realistas. Los experimentos idealizados intentan representar las principales características de la batimetría realista, logrando encontrar la influencia de la forma del fondo sobre la circulación media mediante variables geométricas regulables. Los experimentos idealizados tienen una resolución espacial de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$.

Se configuró un experimento que simula la estructura morfológica del GN, con el fin de representar el cuadrupolo de vórtices en la zona de la boca y el giro de circulación interior. La geometría del modelo idealizado del GN, tiene profundidad constante de 30 metros en la zona externa y profundidad con variación gaussiana (isobatas concentricas) en el interior del golfo con profundidades máximas de 120 metros, el diámetro utilizado en el golfo es de 40 km aprox. Las dimensiones de la boca son regulables, por ejemplo en la distancia de estrangulación de la boca (b). Se utilizaron tres distancias diferentes para evaluar la influencia sobre la formación de dipolos internos. En el caso GN1 (control) el valor de b es 15 km, mientras que para el caso GN2, b se reduce a 8 km y en GN3 la apertura de la boca es total.

El modelo idealizado del GSM se configuró con profundidades constantes de 20 metros en todo el dominio a excepción de las concavidades propias del golfo. En este caso, para

determinar la variación de intensidad de los giros de circulación, se ubicó la concavidad (profundidad parabólica) del golfo desplazada hacia el norte (GSM1) y otro experimento donde se modela con dos cuencos de profundidad parabólica de idénticas características, uno al Norte y otro en el Sur (GSM2), el cual se asemeja más al caso realista.

En la figura 5, se observa para el experimento GN1 la función corriente y las velocidades medias luego de 30 días de simulación computacional. La estructura de cuadrupolos queda perfectamente definida en el caso idealizado (Fig 5a), donde en la zona externa del golfo los vórtices de circulación muestran una simetría, mientras que el dipolo del interior se muestra asimétrico dependiendo de la apertura de la boca (GN2 y GN3). En la zona externa, se genera un giro ciclónico (al Norte) de aproximadamente 0,015 Sv cerrado y definido de 10 km de diámetro. Al sur de la zona externa se genera un giro cerrado casi simétrico al del norte pero de sentido de circulación inverso y inferior en intensidad (0.01 Sv). En el interior el dipolo se desarrolla más que en el exterior y se observa un claro dominio del giro ciclónico con intensidades cercanas a los 0.2 Sv. La estructura de cuadrupolo en el sector de la boca se encuentra en concordancia con la estructura mostrada por el modelo realista (Fig 4), a pesar de que en el caso realista debido a la forma irregular del fondo los giros sufren degeneraciones. Los vectores de corrientes residuales muestran el comportamiento medio de los giros de circulación en las cercanías de la boca del golfo (zona de estrangulación). Los vectores se amplifican en la zona cercana a las paredes donde el flujo se estrangula y en la zona de interacción de los dos vórtices donde se produce un jet intenso hacia fuera en la zona externa y hacia el interior en el dipolo interno.

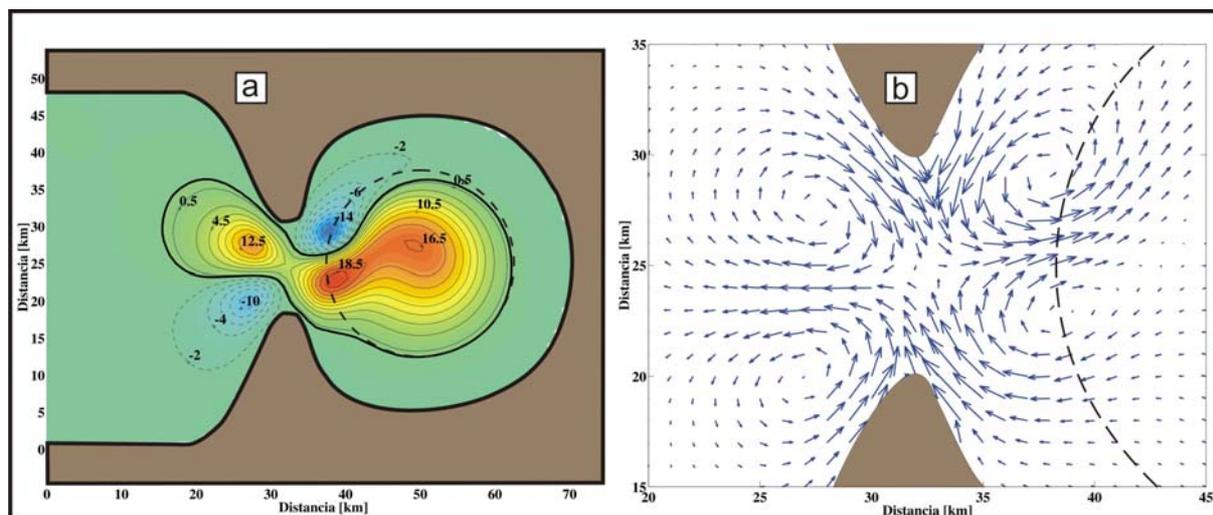


Figura 5. Golfo idealizado de control (GN1). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Función corriente de las velocidades medias ($IC= 0.5 \text{ e3 m}^3/\text{s}$). b) Vectores de las corrientes medias residuales.

Desde los experimentos de sensibilidad (Fig. 6) podemos determinar la influencia de la variable b en la estructura de cuadrupolos. El caso GN2, tiene un valor de b inferior al GN1, es decir que produce una mayor estrangulación del flujo en el intercambio del golfo con aguas externas. La característica más importante que se observa es una amplificación del giro anticiclónico en el interior del golfo en dimensión, logrando dominar gran parte del golfo. El giro ciclónico del cuadrupolo en el interior aumenta en intensidad pero se reduce espacialmente. El dipolo en la zona externa permanece casi invariante espacialmente y alcanza intensidades mayores. Este efecto es debido a que al tener una mayor estrangulación el fluido, las corrientes se incrementan en la zona de la boca, aumentando a su vez los

términos de fricción de fondo y fricción en las paredes laterales, el análisis de vorticidad explicará algunos de estos puntos. El experimento que muestra el golfo abierto a aguas externas muestra una circulación ciclónica débil en el interior del golfo y en el resto del dominio (Fig. 6b). El mecanismo es inverso al caso GN2, donde la menor restricción del flujo de intercambio, reduce notablemente las intensidades de las corrientes y la circulación queda dominada por la advección y por la topografía de fondo.

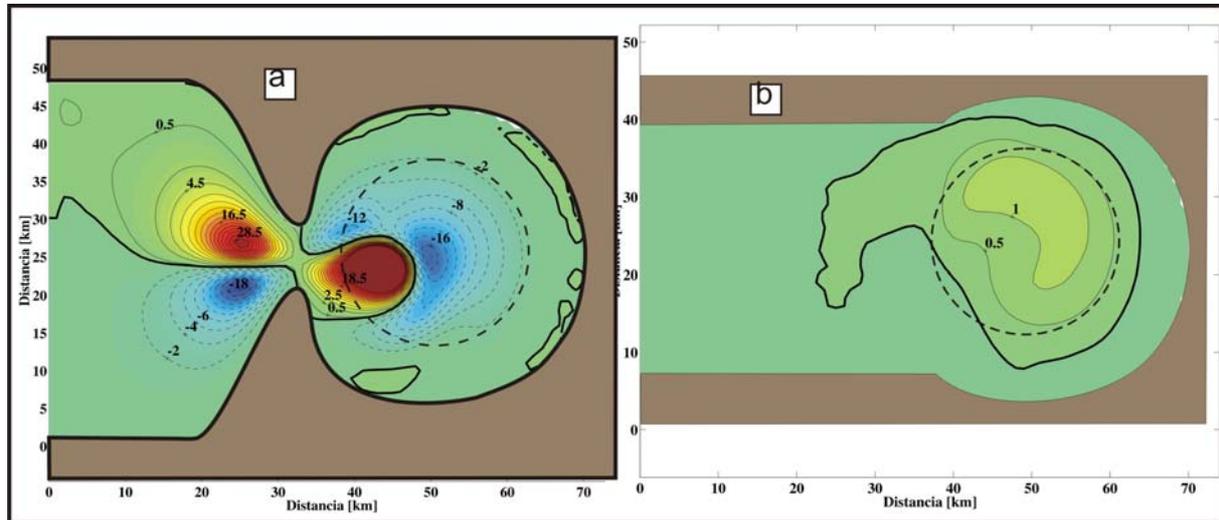


Figura 6. Función corriente de las velocidades medias ($IC = 0.5 \text{ e}3 \text{ m}^3/\text{s}$). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Experimento GN2. b) Experimento GN3.

Por otro lado, se condujeron experimentos idealizados del GSM (GSM1 y GSM2), con la intención de determinar los mecanismos responsables de la intensidad de los giros internos del GSM.

El experimento GSM1, donde la concavidad se encuentra desplazada hacia el norte, observamos una circulación ciclónica que gobierna la mayor parte del golfo con intensidad máxima de 0.19 Sv , y en zonas costeras de profundidad constante anticiclónica (Fig. 7a). Al adicionar al mismo dominio una concavidad de idéntica característica en la zona Sur (Fig. 7b) la circulación media muestra dos giros de recirculación, con diferente intensidad. El giro ubicado al Sur, alcanza 0.26 Sv de intensidad, mientras que el del Norte alcanza 0.19 Sv . Esto demuestra que la intensidad del giro aumenta a medida que el centro del mismo se ubique hacia el Sur, siendo idéntica la batimetría de los cuencos.

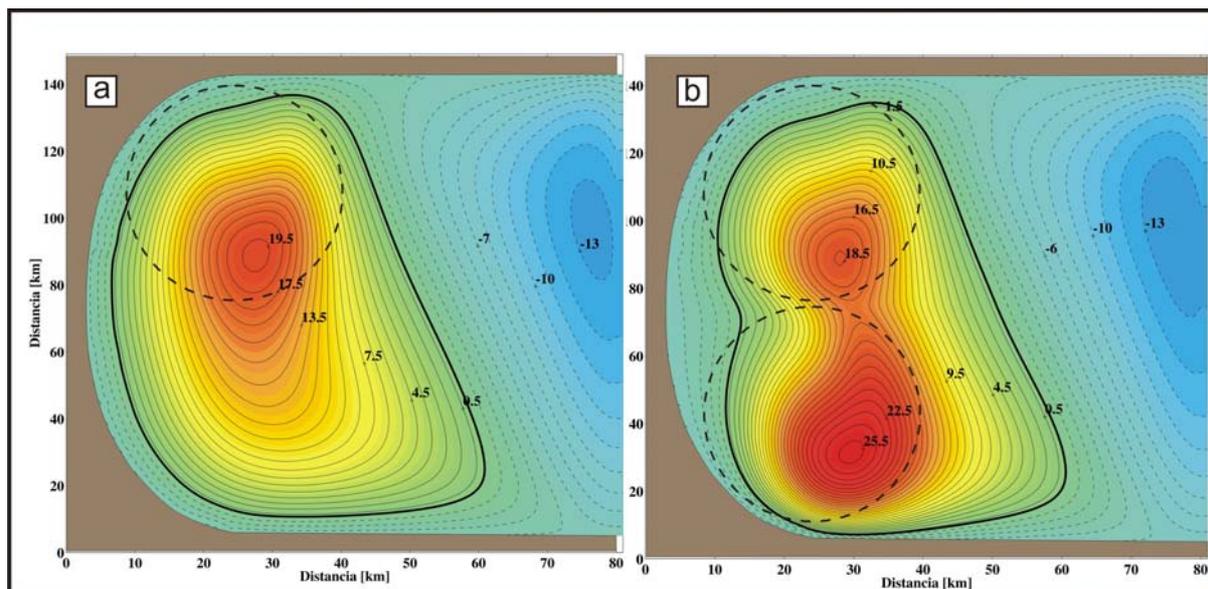


Figura 7. Función corriente de las velocidades medias (IC= 0.5 e3 m3/s). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Experimento GSM1. b) Experimento GSM2.

3.3.3. Balance de vorticidad

Tomando el rotor de las ecuaciones de movimiento en coordenadas cartesianas se llega a la ecuación de balance de vorticidad (Robinson, 1983):

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{D} \left(\frac{\partial(DV)}{\partial t} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{D} \left(\frac{\partial(DU)}{\partial t} \right) \right) \right]}^{\text{I}} + \overbrace{\frac{f}{D} \left[\frac{\partial \eta}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla D \right]}^{\text{II}} - \overbrace{\beta V}^{\text{III}} = \\
 & \overbrace{\text{curl}_z [(-ADV + DIFF)/D]}^{\text{IV}} - \overbrace{\left[\frac{\partial \left(\frac{\tau^b}{D} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(\frac{\tau_x^b}{D} \right)}{\partial y} \right]}^{\text{V}} - \overbrace{\left[\frac{\partial \left(\frac{\tau_y^w}{D} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(\frac{\tau_x^w}{D} \right)}{\partial y} \right]}^{\text{VI}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Donde el término I representa la **tendencia**, el II **stretching**, el tercer término (III) es **Beta**, el IV es el rotor de la **advección**, V es el rotor de la **fricción de fondo** y el VI es el rotor de la tensión del **viento**.

La Vorticidad residual tiene origen en la transferencia de la Vorticidad de marea al flujo medio residual. Por lo tanto, la producción de la Vorticidad de marea es esencial para los vórtices residuales. La vorticidad mareal puede ser clasificada en la siguiente forma: vórtices de cuenca, vórtices de promontorios y vórtices topográficos (Ridderinkhof, 1989).

Con el fin de determinar los balances de fuerza principales en el dominio de estudio se llevó a cabo un análisis de balance de vorticidad del caso idealizado del GN1 (control).

La figura 8a muestra la vorticidad residual luego de 30 días de simulación. La zona donde aparecen los cuatro núcleos de los giros muestran una respuesta altamente no lineal, producto de la rectificación de de la onda de marea por cambios bruscos de dirección (advección). Los

signos de la vorticidad residual son tales que aparecen negativos en los giros ciclónicos y positivos en los anticiclónicos. La línea punteada negra indica la transecta de análisis del balance de vorticidad (fig. 8b). El balance en la zona de los vórtices es entre el rotor de la advección y el rotor de la fricción de fondo, siendo el resto de los términos prácticamente despreciables. El balance (Fig. 8b) muestra un claro aumento de los términos de vorticidad en la zona de los vórtices puntualmente en los núcleos, mientras que en el resto del dominio los valores son de órdenes de magnitud inferiores. Este balance coincide con estudios similares en vórtices de promontorios (Pingree & Maddock, 1977, 1979). En el giro ciclónico en la zona externa al golfo, la fricción de fondo adquiere valores positivos y la advección negativos al igual que la vorticidad residual. Los mapas de advección y fricción de fondo se pueden visualizar en las figuras 8c y 8d, los cuales revelan una alta concordancia con el balance de vorticidad y trabajos previos (Ridderinkhof, 1989, Zimmerman, 1978, 1980a).

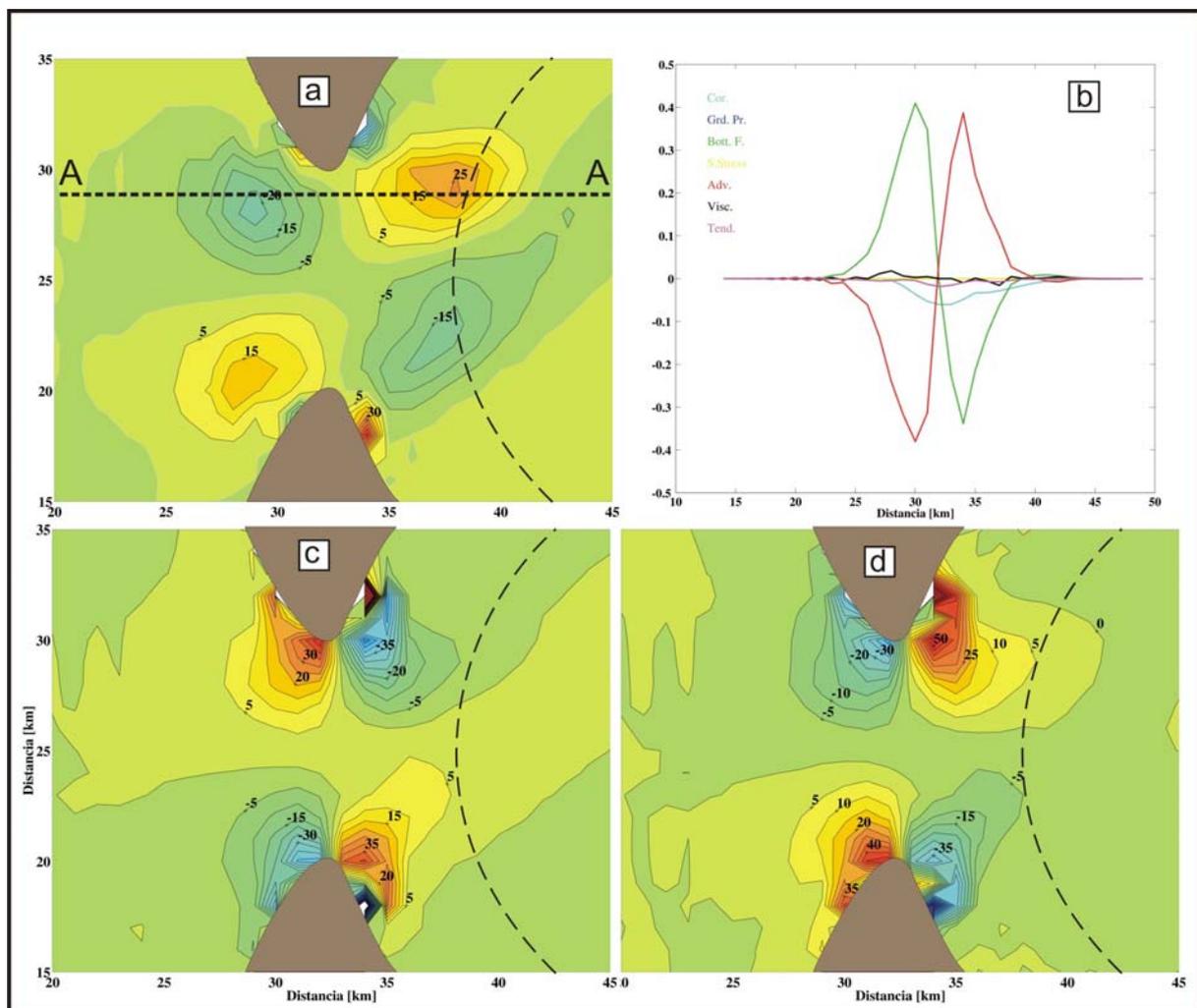


Figura 8. Vorticidad del experimento GN1 (intervalo de contornos = $5e3 \text{ m}^3/\text{s}$). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Vorticidad residual y transecta de análisis A-A en línea negra punteada. b) Balance de vorticidad para la transecta A-A. c) Rotor de la fricción de fondo y d) rotor de la advección.

Realizando un análisis más detallado del término de fricción de fondo, podemos determinar con precisión el balance de fuerzas actuantes en la zona de los vórtices.

De la ecuación 3 la fricción de fondo (V) se puede desglosar en:

$$\overline{\left[\frac{\partial \left(\frac{\tau_y^b}{D} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(\frac{\tau_x^b}{D} \right)}{\partial y} \right]} = \overline{\text{VI}} \times \frac{\nabla \lambda}{D^2} - \overline{\text{VII}} \times \frac{2\lambda(\nabla D)}{D^3} - \overline{\text{VIII}} \times \frac{\lambda}{D^2} \left[\frac{\partial(VD)}{\partial x} - \frac{\partial(UD)}{\partial y} \right] \quad (4)$$

VI es dependiente del gradiente del flujo medio (Corte lateral), existe aún con topografía constante y es cero para parametrizaciones lineales de la fricción. VII aparece en presencia de topografía de fondo variable (variaciones normales a la dirección local del flujo) y es diferente de cero para parametrizaciones lineales del término de fricción.

VIII es la disipación irreversible de vorticidad por fricción de fondo (Notar que el coeficiente λ/D^2 es siempre positivo).

En la figura 9, se graficaron los términos desglosados del rotor de la fricción de fondo, la disipación irreversible (Fig. 9a), la fricción debido a la pendiente de la topografía de fondo (Fig. 9b) y la fricción debido al gradiente del flujo medio (Fig. 9c). Gran parte de la fricción está controlada por la disipación generada por el cambio brusco de dirección, mientras que el segundo factor importante es el debido al gradiente de la topografía de fondo (Fig. 9c).

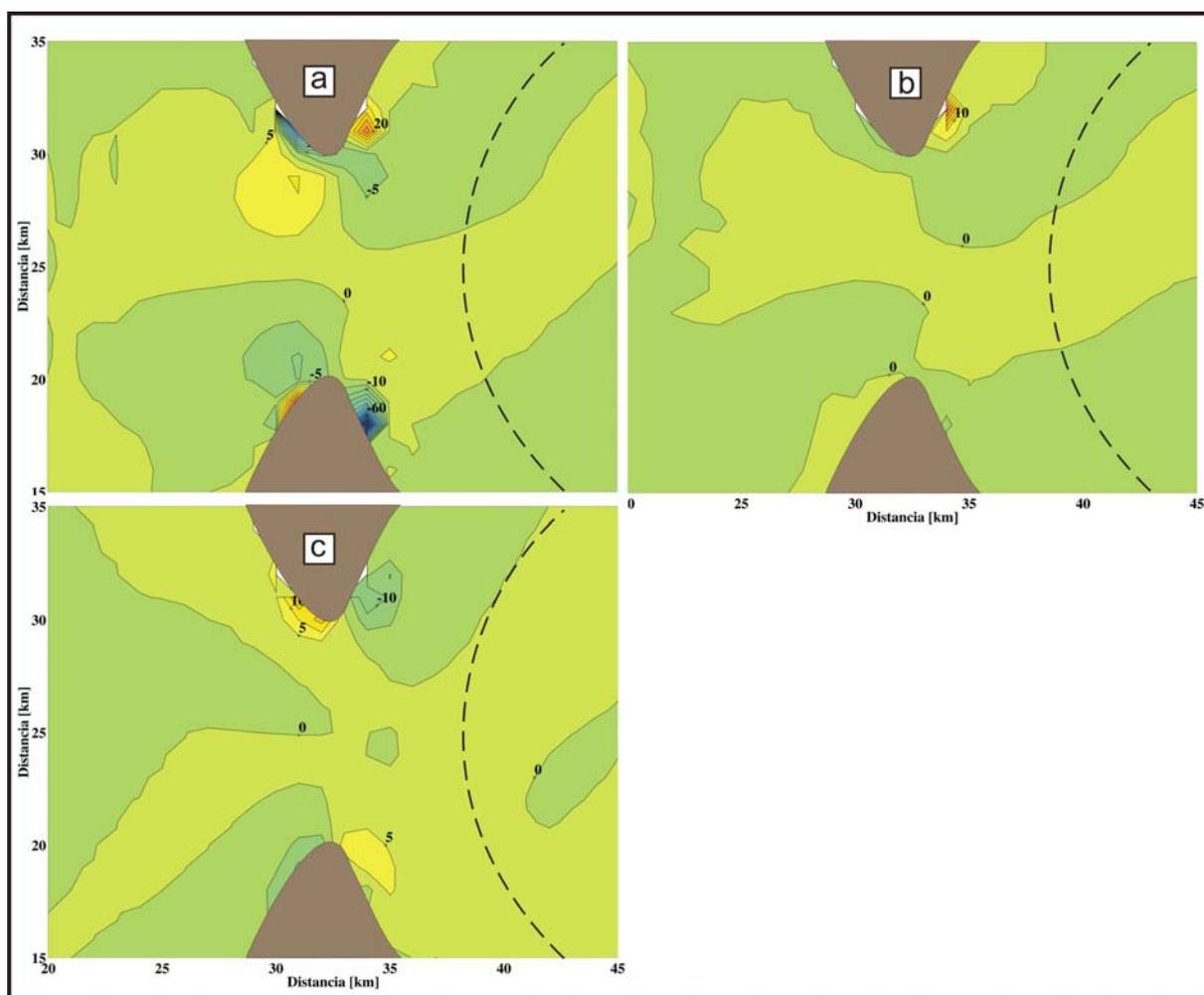


Figura 9. Análisis del término de fricción de fondo (intervalo de contornos $=5e3$ m³/s). La línea punteada gruesa se indica la ubicación de la variación batimétrica. a) Término de disipación irreversible de la vorticidad. b) Vorticidad debido al gradiente del flujo medio. c) Vorticidad debido al gradiente de la topografía de fondo.

3.3.4. Experimentos Realistas.

Aplicando la clasificación de [Ridderinkhof \(1989\)](#), podemos realizar un análisis para nuestro caso de estudio realista. (Fig. 10a). Las bocas de los golfos GSJ y GN, debido a su estrecha comunicación con aguas externas, poca profundidad en la boca y forma de fondo en el interior actuando bajo un flujo oscilatorio de marea, generan corrientes residuales con estructura de cuadrupolos de vórtices en las zonas cercanas a las bocas, como bien se fundamenta en trabajos previos. Dos de estos vórtices se ubican en la zona externa en forma de dipolo, uno horario y otro antihorario. El segundo dipolo en la zona interna en sentido de giro opuesto al dipolo externo. Los modelos idealizados previos muestran una estructura de cuadrupolos simétricos con respecto al eje central de la boca y con respecto al interior y exterior. Tanto en la boca del GN como en la del GSJ, la estructura de cuadrupolo aparece fuertemente marcada, con la diferencia al caso idealizado de que los giros sufren modificaciones (cuadrupolos degenerados), en intensidad, ubicación y dimensiones debido a los factores realistas existentes en el lugar de estudio. El GSJ al estar conectado con aguas internas del GSM, el fuerte giro horario existente en este último advecta el dipolo hacia el Oeste, con la consecuencia de que el vórtice antihorario queda suscripto a la costa tendiendo a desaparecer y el vórtice horario queda centrado sobre en la zona central de la boca y sufriendo un aumento en intensidad debido a la forma topográfica del fondo. El dipolo interno del GSJ, se comporta similar al caso idealizado por ser de menor profundidad, dominando casi completamente la dinámica interna del GSJ.

En el GN ambos vórtices horarios (exterior e interior al GN) se encuentran inmersos en la circulación aledaña, siendo modificados del cuadrupolo ideal. En la zona interna, la forma de la costa en la boca difiere la Norte a la Sur en que su cambio de pendiente es menos abrupto, produciendo un desplazamiento del Vórtice horario hacia el interior del golfo por lo cual es capturado por el intenso giro horario interno. El Vórtice antihorario en la costa Sur es definido y queda limitado a la zona costera.

Esta estructura de cuadrupolo en ambos golfos puede incluirse en la clasificación de [Ridderinkhof](#) como Vórtices de promontorio o variaciones repentinas de dirección de la línea de costa. Al Norte de PV, se observa un giro antihorario que podemos clasificarlo como vórtice de promontorio, generado por el cambio repentino de dirección de la costa en Punta Norte de PV.

En la zona de la boca del GSM y al Este de PV podemos identificar lo que se denominan Vórtices topográficos, debidos a variaciones repentinas de la forma de fondo como puede ser un banco o depresión. La batimetría en la zona y la vorticidad residual generada tienen un alto grado de concordancia (generando vorticidades positivas en zonas de bancos y negativas en las depresiones). Por otro lado, el experimento realizado con batimetría constante de 100 m (Fig. 10b) demuestra que tales vórtices no se generan mediante el mecanismo de fricción de fondo en presencia de topografía variable, aunque sí se genera la vorticidad producida por la parametrización cuadrática de la fricción en presencia de topografía plana, en el caso de baja profundidad (50 metros) (experimento no mostrado).

La circulación dentro de los golfos GN y GSM, responde mayormente a vórtices de cuenca. En nuestros experimentos idealizados (GN1, GSM1) observamos que las corrientes residuales de marea en estos dominios responden con circulación horaria en líneas de corriente que siguen aproximadamente las isobatas. La producción de vorticidad está dada por la advección y fricción de fondo en presencia de topografía variable y forzada por la aceleración de Coriolis. Desde nuestro experimento sin el término de Coriolis (Fig. 10c), observamos que la circulación es altamente irregular e indefinida, tanto para el GN como para el GSM. Una de las características importantes para este experimento es que, el dipolo formado en la boca del GSJ del lado interior del GSM, sufre otro tipo de degeneración. Ya que la circulación intensa horaria es inexistente, el dipolo está más centrado en la boca que el caso de control y el giro

antihorario correspondiente al dipolo se ve abruptamente amplificado por la variación topográfica del interior del GSM (evento que sucede para el giro horario en el exp. de control (Fig. 10a)). En el experimento sin el término de advección (parte no-lineal) (Fig. 10d) en concordancia con lo esperado por los fundamentos de trabajos previos, la producción de vorticidad y en conclusión los vórtices de cuenca, los de promontorios y los topográficos son inexistentes. Demostrando que la principal fuente de producción de vorticidad es la advección. Para el experimento de profundidad constante los vórtices de cuenca al ingreso de los golfos se mantienen aunque más débiles, ya que el principal mecanismo de producción es el rotor de advección, pero existe un aporte importante del rotor de fricción de fondo en presencia de topografía variable.

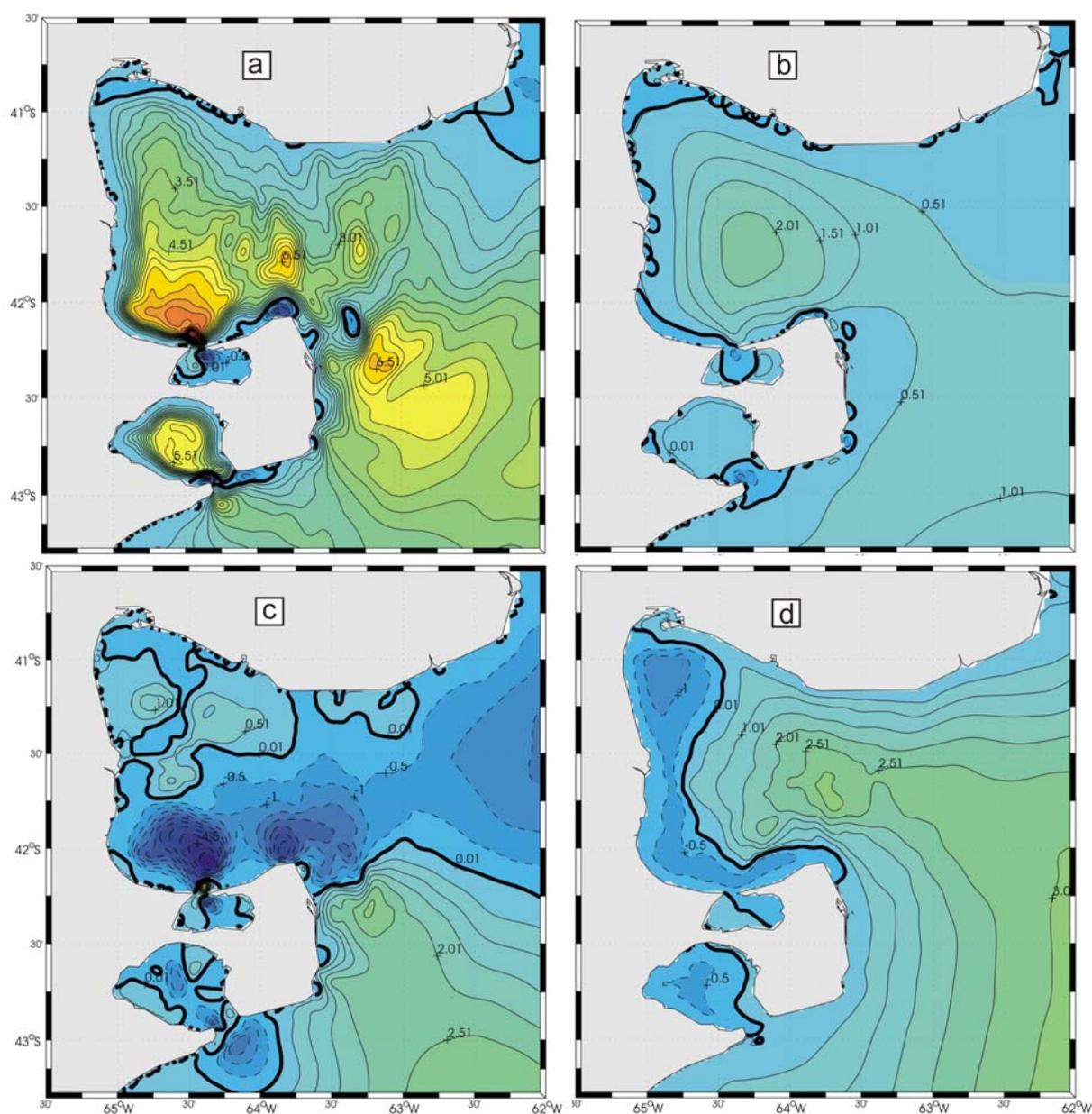


Figura 10. Función corriente de experimentos forzados con marea. a) Exp. Control, b) Exp. Profundidad 100m c) Exp. sin Coriolis, d) Exp. sin termino de advección

Tanto los experimentos idealizados del GN (GN1, GN2 y GN3) como los del GSM (GSM1 y GSM2) se muestran representativos de las características observadas en los modelos reales y confiables para su utilización como herramienta de prueba.

Se llevaron a cabo otros experimentos idealizados con diferentes discretizaciones espaciales (no incluidos en el trabajo) que muestran características similares a las observadas, lo cual indica un grado de independencia con el tamaño de grilla utilizada, no así con la forma de línea de costa en la boca de los golfos (modificando la variable "b") lo cual queda demostrado con los experimentos mostrados (GN1 y GN2).

Por otro lado, el tamaño del dominio utilizado no genera influencia sobre los giros observados en la boca y en el interior de los golfos ya que el modelo realista (supera el doble de cantidad de nodos del idealizado) posee los bordes abiertos más alejados y muestra un comportamiento similar de la dinámica en las inmediaciones de la boca y en el interior de los golfos.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo empleamos un modelo numérico de alta resolución para estudiar los flujos de energía, disipación y flujos residuales generados por la marea en la región. Del trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las amplitudes y fases de la onda de marea y las velocidades (elipses de marea) modeladas concuerdan con mediciones de tablas de marea y las escasas observaciones de corrientes disponibles.
- Los máximos valores de disipación energía mareal alcanzan los 16 W/m², y a diferencia de modelos previos de menor resolución se concentra mayormente al NE de PV.
- El flujo de energía de la componente principal, muestra flujos de Sur a Norte, ingresando un alto porcentaje en el GSM siguiendo la línea de costa y egresando un porcentaje inferior de la energía, mostrando relación con la disipación generada en la boca del GSM. En el GN, también se produce una gran disipación de energía en la boca, resultando en flujos de energía despreciables en el interior.
- Las corrientes residuales marcan características de circulación básicas para la comprensión de la circulación media, tales como giros de recirculación (vórtices) al Norte de PV, sobre bancos de baja profundidad y estructura de cuadrupolos en las bocas del GN y GSJ. En el interior del GN y GSM la circulación debida a la marea es con giros ciclónicos.
- Los giros en el interior de los golfos, se pueden clasificar como vórtices de cuenca, y son debidos a la advección y efecto de Coriolis en presencia de topografía variable. En el GN está regulado principalmente por la estrangulación del flujo en la boca, mientras que la intensidad de los giros en el GSM está regulada por la ubicación de los cuencos de máxima profundidad, con mayor intensidad en el cuenco Sur.
- La estructura de cuadrupolos en la boca del GN y GSJ, se genera por el flujo oscilatorio de la marea (rectificación no -lineal) en un canal de restringidas dimensiones. Están regulados principalmente por el rotor de la advección y el rotor de

la fricción de fondo, el cual es altamente dependiente de forma de la línea de costa. El término de disipación irreversible en los núcleos de los cuadrupolos es máximo.

- El modelo realista muestra la importancia fundamental del término advectivo en la circulación forzada por marea. Desde el experimento sin el término de advección, desaparecen las estructuras básicas encontradas: cuadrupolos, vórtices de recirculación (topográficos) y giros ciclónicos en el interior de los golfos.

5. REFERENCIAS

- Davies, A.M., J. Sauvel and J. Evans, Computing near coastal tidal dynamics from observations and a numerical model. *Continental Shelf Research*, 4: 341–366, 1985.
- Glorioso, P. D., and R. A. Simpson. “Numerical modelling of the M2 tide on the northern Patagonian Shelf”, *Continental Shelf Research*, 14: 267–278, 1994.
- Glorioso, P. D., and R. A. Flather. “The Patagonian Shelf tides”, *Prog. Oceanogr.*, 40: 263–283, 1997.
- Lynch, D. R., and C. E. Naimie. “The M_2 tide and its residual on the outer banks of the Gulf of Maine”, *J. Phys. Oceanogr.*, 23: 2222–2253, 1993.
- 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.
- Palma, E. D., R. P. Matano, and A. R. Piola, “A Numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf Circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing”. *Journal of Geophysical Research*, 109, CO8014, doi:10.1029/2004JC002315, 2004.
- Park, M. J. and D. P. Wang, “Tidal vorticity over isolated topographic features”, *Cont. Shelf Res.*, Vol 14, No 13/14: 1583-1599, 1994.
- Pingree R.D., The formation of the Shambles and other banks by tidal stirring of the seas, *Journal of the Marine Biological Association, UK* 58: 211–226, 1978.
- Pingree R. D. and Maddock L. Rotary current and residual circulation around banks and islands, *Deep-Sea Research*, 32:8: 929-947, 1985.
- Ridderinkhof H., Tidal and residual flows in the western Dutch Wadden Sea, III: Vorticity balances, *Netherlands Journal of Sea Research* 24: 9–26, 1989.
- Rivas, A. L. , Corrientes originadas por la acción del viento y la marea en el Golfo Nuevo. *Geoacta*, 16: 185-205, 1989.
- Robinson, I. S, Tidal vorticity and residual circulation. *Deep-Sea Res.*, 28A: 195–212, 1981.
- Robinson, I. S. , “Tidally induced residual flows”, *Physical oceanography of coastal and shelf seas*, B. Johns, editor, Elsevier, Amsterdam: 321-356, 1983.
- 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.
- Simonato, C.G., Dragani, W., Nuñez, M. y Engel, M. “A Set of 3-D Nested Models for Tidal Propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary – Part I. M2”, *Journal of Coastal Research*, 20 (3): 641-936, 2004.
- 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: 1461-1479, 2006.
- Zimmerman, J.T.F. Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 11: 35–47, 1978.
- Zimmerman, J.T.F. Dynamics, diffusion, and geomorphological significance of tidal residual eddies. *Nature*, 290: 549–555, 1981.