

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA Y ENERGÉTICA DE LA MAREA EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

TIDAL DYNAMICS AND ENERGY BUDGET IN THE GULF OF CALIFORNIA

G. García-Silva
S.G. Marinone

Departamento de Oceanografía Física
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Km 107 carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, CP 22860, Baja California, México
E-mail: garciag@cicese.mx; marinone@cicese.mx

Recibido en diciembre de 1999; aceptado en marzo de 2000

RESUMEN

Se estudió numéricamente el comportamiento dinámico y energético de la marea en el Golfo de California a partir de sus principales componentes. Se escogieron tres casos: el primero incluyó la componente M_2 ; el segundo, las dos principales componentes semidiurnas; y el tercero, las siete componentes más importantes de la marea en el golfo. Los resultados muestran que el modelado de la marea fue satisfactorio para todas las componentes y para todos los casos. Se probó que pequeñas variaciones del coeficiente de fricción produjeron errores importantes en el ajuste de la marea. El comportamiento dinámico y energético de la marea no cambió al variar el coeficiente de fricción ni al incluir más componentes. Las fuerzas más importantes que mantienen el balance de momento en todo el golfo son el gradiente de presión, Coriolis y la fricción. En la región norte las fuerzas más importantes son el gradiente de presión y la fricción, mientras que en el sur del golfo las fuerzas más importantes están en balance geostrofico. La advección también es importante en la región norte y en el archipiélago de las grandes islas. Las regiones donde se disipa la mayor parte de la energía proveniente de la marea son la región norte y el archipiélago de las grandes islas, principalmente en el Alto Golfo, en Bahía Adair, en el Canal de Ballenas y en los umbrales de San Lorenzo y San Esteban. La inclusión de más componentes introdujo una mayor cantidad de momento y energía al golfo; parte de este momento y energía fue transferido al promedio y parte a frecuencias bajas. Los resultados muestran que la variación del coeficiente de fricción no afectó el comportamiento de la marea en el golfo, pero sí la estimación de la energía que se disipa en promedio dentro de él.

Palabras clave: mareas, momento, energía, Golfo de California.

ABSTRACT

The dynamics and energetic behavior of the tides in the Gulf of California were studied with their principal constituents. Three cases were chosen: the first included the M_2 constituent; the second, the two principal semidiurnal constituents; and the third, the seven most important tidal constituents in the gulf.

The results show that the tide was successfully modeled for all constituents and for all cases. It was proved that small changes in the friction coefficient produce important errors in the tidal adjustment. The dynamics and energetic behavior of the tides did not change while varying the friction coefficient, even when more constituents were included. The most important forces that maintain the momentum balance in the gulf are the pressure gradient, Coriolis and friction. In the northern gulf the most important forces are the pressure gradient and friction, while in the southern gulf the most important forces are in geostrophic balance. Advection is also important in the northern gulf and in the archipelago of the large islands. The regions where most of the tidal energy is dissipated are the northern gulf and the archipelago, especially in the Upper Gulf, Adair Bay, Ballenas Channel, and San Lorenzo and San Esteban sills. The inclusion of more constituents introduced more momentum and energy to the gulf, and part of this momentum and energy was transferred to the mean field and part to the low-frequency field. The results show that changes in the friction coefficient did not affect the tidal behavior in the gulf; nevertheless, the tidal energy dissipation estimated inside the gulf was affected.

Key words: tides, momentum, energy, Gulf of California.

INTRODUCCIÓN

El Golfo de California es un mar marginal ubicado al noroeste de la República Mexicana (fig. 1). Está limitado al este por los estados de Sonora y Sinaloa y al oeste por la península de Baja California. Mide aproximadamente 180 km de ancho y 1100 km de largo, y presenta una profundidad máxima de 3600 m en la boca.

La marea en el Golfo de California ha sido ampliamente estudiada a través de observaciones o investigaciones numéricas. La componente más energética de la marea es la M_2 y, debido a esto, la mayoría de las investigaciones sobre la marea que se han realizado en el golfo han incluido a esta componente. Algunas características por las cuales la M_2 ha provocado gran interés son: genera corrientes de gran magnitud en algunas regiones del golfo (Badan-Dangon *et al.*, 1991), su amplitud puede alcanzar hasta 2 m en la región norte (Marinone, 1997) y disipa cerca del 90% de la energía proveniente de las componentes semidiurnas (Filloux, 1973). Aunque la M_2 es la componente más importante, la interacción de los principales constituyentes eleva la amplitud de la marea total en la región norte hasta 5 m,

INTRODUCTION

The Gulf of California is a marginal sea located in northwestern Mexico (fig. 1). The states of Sonora and Sinaloa form its eastern border and the peninsula of Baja California, its western. It is approximately 180 km wide, 1100 km long and has a maximum depth of 3600 m at the mouth.

The tides in the Gulf of California have been extensively studied through observations and numerical studies. The most energetic constituent of the tide is the M_2 and, for this reason, most of the research that has been conducted on the tide in the gulf has included this constituent. Some of the reasons why the M_2 has created such interest are: it generates high-magnitude currents in some regions of the gulf (Badan-Dangon *et al.*, 1991), its amplitude can reach up to 2 m in the northern region (Marinone, 1997) and it dissipates close to 90% of the energy coming from the semidiurnal constituents (Filloux, 1973). Even though the M_2 is the most important constituent, its interaction with the principal constituents raises the amplitude of the total tide in the northern



Figura 1. Localización del Golfo de California. Los números del 1 al 13 son las estaciones mareográficas usadas para calibrar el modelo (ver tabla 3). Los números romanos muestran la región norte y la zona de las grandes islas del golfo. Se muestra la ubicación de diferentes regiones mencionadas en el texto: (a) Alto Golfo, (b) Bahía Adair, (c) Cuenca del Delfín, (d) Canal de Ballenas, (e) zona de umbrales y (f) sur del golfo.

Figure 1. Location of the Gulf of California. Numbers 1 to 13 are the tidal stations used to calibrate the model (see table 3). The Roman numerals indicate the northern region and the area of the large islands. The location of the different regions mentioned in the text is shown: (a) Upper Gulf, (b) Adair Bay, (c) Delfin Basin, (d) Ballenas Channel, (e) sill zone and (f) southern gulf.

además de que introduce una mayor cantidad de energía al golfo, la cual es transferida a frecuencias altas y bajas provocando que la disipación de energía por fricción de fondo aumente considerablemente (Marinone, 1997); sin embargo, aunque estas características son importantes, son pocos los estudios numéricos que han incluido otras componentes conjuntamente. Éstas son algunas razones que motivaron la realización de este trabajo, donde se pretende realizar un balance dinámico y energético de la marea debido a sus principales componentes.

region to 5 m and introduces a larger amount of energy into the gulf, which is transferred to high and low frequencies, causing a considerable increase in the dissipation of energy due to bottom friction (Marinone, 1997); however, even though these characteristics are important, there are few numerical studies that have included other constituents. These are some of the reasons that motivated this study, which attempts to carry out a dynamic and energy balance of the tide, based on its principal constituents.

Antecedentes

Los estudios numéricos sobre la marea en el Golfo de California abarcan desde modelos unidimensionales hasta tridimensionales. Ripa y Velázquez (1993) usaron un modelo numérico unidimensional y trabajaron con las principales componentes diurnas y semidiurnas. Para cada componente obtuvieron un buen ajuste con respecto a las observaciones y, debido a que el modelo que utilizaron fue lineal, trabajaron con cada armónico en forma separada.

Argote *et al.* (1995) utilizaron un modelo bidimensional no lineal y trabajaron únicamente con la M_2 . Concluyeron que la disipación de energía ocurre básicamente en cuatro regiones: en la cabeza del golfo, en Bahía Adair, al norte y sur del Canal de Ballenas, y en los umbrales de San Lorenzo y San Esteban, áreas donde precisamente se presentan fuertes corrientes de marea e intensa mezcla vertical.

Marinone (1997) estudió la circulación residual en el Golfo de California. Utilizó un modelo numérico bidimensional no lineal y forzó en la frontera abierta con las siete componentes de marea más importantes del golfo. Sus resultados muestran que la interacción de todas las componentes produce corrientes residuales del mismo orden que las que produce únicamente la M_2 , debido a que la mayor parte de la energía adicional que entra al golfo se transfiere a frecuencias altas y bajas y no tanto al promedio; al incluir varias componentes simultáneamente, las interacciones no lineales producen fluctuaciones, siendo la más importante la variación quincenal generada por la M_2 y la S_2 . Concluyó que para obtener una buena aproximación de la circulación residual del golfo es suficiente modelar con la M_2 , mientras que la inclusión de la S_2 es necesaria para obtener las fluctuaciones.

Carbajal y Backhaus (1998) realizaron un balance energético en el golfo pero sólo con las

Background

The numerical studies of the tide in the Gulf of California include from one-dimensional to three-dimensional models. Ripa and Velázquez (1993) used a one-dimensional numerical model and worked with the principal diurnal and semidiurnal constituents. They obtained a good fit for each constituent with respect to the observations and since the model they used was linear, they worked with each harmonic separately.

Argote *et al.* (1995) used a nonlinear two-dimensional model and worked only with the M_2 . They concluded that the dissipation of energy occurs mainly in four regions: at the head of the gulf, at Adair Bay, to the north and south of Ballenas Channel, and at the San Lorenzo and San Esteban sills, areas where there are strong tidal currents and intense vertical mixing.

Marinone (1997) studied the residual circulation in the Gulf of California. This author used a nonlinear two-dimensional numerical model and forced the open boundary with the seven most important tidal constituents of the gulf. The results indicate that the interaction of all the constituents produces residual currents of the same order than those produced by the M_2 alone, because most of the additional energy that enters the gulf is transferred to high and low frequencies and very little to the average; by including various constituents simultaneously, the nonlinear interactions produce fluctuations, the most important being the fortnightly variation generated by the M_2 and the S_2 . This author concluded that in order to obtain a good approximation of the residual circulation of the gulf, it is sufficient to model with the M_2 , whereas the inclusion of the S_2 is needed to obtain the fluctuations.

Carbajal and Backhaus (1998) conducted an energy balance in the Gulf of California

dos principales componentes semidiurnas, la M_2 y la S_2 . Concluyeron que la mayor parte de la energía se disipa en la región del delta del Río Colorado, en el Canal de Ballenas y en el umbral de Salsipuedes. Al igual que Marinone (1997), sus resultados también muestran que la disipación de energía en conjunto de la M_2 y la S_2 es mayor que la suma lineal de la disipación de cada una de ellas simuladas en forma separada, por lo que las interacciones no lineales entre las componentes producen una mayor disipación. En todos los estudios mencionados se han realizado estimaciones de la disipación de energía que producen las principales componentes de marea. Stock (1976) y Zavala (1993) modelaron la marea en el golfo utilizando diferentes parametrizaciones de la fricción. Sus resultados muestran que la disipación de energía y su distribución espacial son sensibles al término de fricción usado.

Como sabemos, los resultados de los trabajos numéricos se comparan con las observaciones y se procura reducir el error al máximo, es decir, se ajustan los valores modelados a los observados para que la diferencia entre ellos sea mínima. Existen varias formas de tratar de ajustar los resultados de un modelo a las observaciones. Una forma de hacer este ajuste es calibrando el modelo con el coeficiente de fricción, esto es, se varía el coeficiente hasta obtener el mejor ajuste con respecto a las observaciones (e.g., Argote *et al.*, 1995; Marinone, 1997). Otra forma de hacer este ajuste es obteniendo cómo debe ser el flujo en la boca, es decir, con base en las observaciones de marea que se tienen a lo largo del golfo se determina el flujo óptimo en la boca con el cual se debe forzar el modelo (e.g., Zavala, 1996; Beier, 1999). En este trabajo, se varió el coeficiente de fricción hasta obtener el mejor ajuste con respecto a las observaciones y se obtuvo un ajuste mejor que en la mayoría de los trabajos previos, como se verá más adelante.

using only the two semidiurnal principal constituents, M_2 and S_2 . They concluded that most of the energy is dissipated in the region of the Colorado River Delta, in Ballenas Channel and in the Salsipuedes sill. Like Marinone (1997), their results also show that the dissipation of energy in conjunction with the M_2 and the S_2 is greater than the linear sum of the dissipation of each one simulated separately, so the nonlinear interactions between the constituents produce a larger dissipation. In all the studies mentioned, estimates have been made of the dissipation of energy produced by the principal constituents of the tide. Stock (1976) and Zavala (1993) modeled the tide in the gulf using different parameterizations of friction. Their results show that the dissipation of energy and its spatial distribution are sensitive to the friction term used.

As is known, the results of numerical studies are compared to observations and the error is reduced as much as possible, that is, the modeled values are fitted to the observations in order to minimize the difference between them. There are many ways to fit the results of a model to the observations. One way is to calibrate the model with the friction coefficient, that is, the coefficient is varied until the best fit is obtained with respect to the observations (e.g., Argote *et al.*, 1995; Marinone, 1997). Another way is to determine how the flow at the mouth should be, that is, the optimum flow at the mouth is determined from the tide observations along the gulf, and this should be used to force the model (e.g., Zavala, 1996; Beier, 1999). In this study, the friction coefficient was varied until obtaining the best fit with respect to the observations. A better fit was obtained than in most of the previous works, as will be shown further on.

The objective of this study is to evaluate the dynamic and energetic behavior of the

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento dinámico y energético de la marea debido a sus principales componentes. Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los estudios sobre la marea y su disipación se han enfocado a la M_2 , a pesar de que la interacción con otras componentes es importante. Aquí se pretende profundizar sobre este tema. De manera particular, se quiere determinar la influencia de la variación del coeficiente de fricción en la disipación de energía que se produce debido a la fricción del fondo.

METODOLOGÍA

Para obtener la evolución temporal de los campos de velocidad y de elevación, se utilizó un modelo numérico bidimensional desarrollado por Crean (1978). Este modelo ya ha sido utilizado en el Golfo de California y reproduce exitosamente las observaciones de marea (Marinone, 1997). Una descripción completa del modelo se puede encontrar en Crean *et al.* (1988).

Una vez obtenidos los campos de velocidad (u, v) y de elevación (η), se evaluaron cada uno de los términos de las ecuaciones de momento y energía en cada paso de tiempo. Las ecuaciones que se utilizaron fueron:

$$\partial u / \partial t = -u \partial u / \partial x - v \partial u / \partial y + fv - g \partial \eta / \partial x - C_d u (u^2 + v^2)^{1/2} H^{-1} + A \nabla^2 u, \quad (1)$$

$$\partial v / \partial t = -u \partial v / \partial x - v \partial v / \partial y - fu - g \partial \eta / \partial y - C_d v (u^2 + v^2)^{1/2} H^{-1} + A \nabla^2 v, \quad (2)$$

y

and

$$\partial \eta / \partial t = -\nabla \cdot (vH), \quad (3)$$

donde (x, y) son las coordenadas cartesianas transversal y longitudinal al golfo; t es el tiempo; $H = \eta + h$ es la profundidad total, η y h son la elevación de la superficie y la profundidad de la columna de agua con respecto al nivel medio del mar; \underline{v} es el vector de velocidad con

tide due to its principal constituents. As mentioned above, most of the studies on the tide and its dissipation have focussed on the M_2 , even though the interaction with other constituents is important. In this study we attempt to delve deeper into this topic. In particular, we want to determine the influence of the variation of the friction coefficient in the dissipation of energy that is produced due to bottom friction.

METHODOLOGY

In order to obtain the temporal evolution of the fields of velocity and elevation, a two-dimensional numerical model developed by Crean (1978) was used. This model has been used in the Gulf of California and it successfully reproduces the tide observations (Marinone, 1997). A complete description of the model can be found in Crean *et al.* (1988).

Once the velocity (u, v) and elevation (η) fields were obtained, all the terms of the momentum and energy equations were evaluated at every time step. The equations used were:

where (x, y) are the transverse and longitudinal Cartesian coordinates in the gulf; t is time; $H = \eta + h$ is total depth, η and h are the elevation of the surface and depth of the water column with respect to the mean sea level; \underline{v} is the velocity vector with components

componentes (u, v) ; $f = 2\Omega\sin(\varphi)$ es el parámetro de Coriolis ($f = 7.1816 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$), φ es la latitud; Ω es la razón de rotación terrestre; C_d es el coeficiente de fricción; A es el coeficiente de viscosidad de remolino ($= 100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$); y g es la aceleración debida a la gravedad ($= 9.81 \text{ m s}^{-2}$).

Multiplicando (1) por Hu , (2) por Hv y (3) por $g\eta$ y sumando, se obtiene la ecuación de energía

$$\partial E / \partial t = -D_f - \nabla \cdot Q + D_v \quad (4)$$

donde

$$E = \frac{1}{2}[(u^2 + v^2)(\eta + h) + g\eta^2] \quad (5)$$

es la energía mecánica (cinética más potencial),

$$D_f = C_d(u^2 + v^2)^{3/2} \quad (6)$$

es la disipación de energía por fricción de fondo,

$$Q = \mathbf{v}(\eta + h)[(u^2 + v^2)/2 + g\eta] \quad (7)$$

es el vector flujo de energía y

$$D_v = A(\eta + h)(u\nabla^2 u + v\nabla^2 v) \quad (8)$$

es la disipación viscosa.

Integrando (4) en toda el área del golfo se obtiene

$$\partial \langle E \rangle / \partial t = - \langle D_f \rangle - F + \langle D_v \rangle \quad (9)$$

donde $\langle \dots \rangle = \int \dots dA$. El flujo en la frontera abierta es $F = \int Q \cdot \underline{n} dS$, donde \underline{n} es un vector unitario normal y dS un elemento de longitud a través de la frontera. Los términos de las ecuaciones (1), (2) y (4) fueron los que se evaluaron.

(u, v) ; $f = 2\Omega\sin(\varphi)$ is the Coriolis parameter ($f = 7.1816 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$), φ is latitude; Ω is the earth's rotation rate; C_d is the friction coefficient; A is the eddy viscosity coefficient ($= 100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) and g is the acceleration due to gravity ($= 9.81 \text{ m s}^{-2}$).

Multiplying (1) by Hu , (2) by Hv and (3) by $g\eta$ and adding, the equation of energy is obtained

where

is the mechanical energy (kinetic plus potential),

is the dissipation of energy due to bottom friction,

is the energy flow vector and

is the viscous dissipation.

Integrating (4) over the entire area of the gulf, we obtain

where $\langle \dots \rangle = \int \dots dA$. The flow in the open boundary is $F = \int Q \cdot \underline{n} dS$, where \underline{n} is the unit normal vector and dS is an element of length along the boundary. The terms of equations (1), (2) and (4) were those evaluated.

Simulaciones

Para estudiar el comportamiento dinámico y energético de la marea se escogieron tres casos, cada uno de los cuales incluyó diferentes componentes de marea. El primer caso incluyó únicamente la M_2 (caso M2); el segundo, las dos principales componentes semidiurnas (caso MS); y el tercero, las siete componentes más importantes de la marea en el golfo (caso "Todos"). Para resolver las diferentes componentes por análisis armónico, la duración de las simulaciones fue de 90 días para los dos primeros casos y 370 días para el último.

Para cada caso se varió el C_d hasta obtener el mejor ajuste entre los resultados del modelo y las observaciones. Como una medida del error o del mejor ajuste, se utilizó la raíz cuadrática media (rcm), definida como

$$\text{rcm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i [O_i^2 + M_i^2 - 2O_i M_i \cos(\phi_i - \theta_i)]} \quad (10)$$

donde O y M son las amplitudes observadas y modeladas, θ y ϕ son las fases observadas y modeladas, y N ($= 13$) es el número de estaciones mareográficas usadas para calibrar el modelo. La ubicación de las estaciones se muestra en la figura 1.

Para cada componente de cada caso se obtuvo una rcm, siendo el mejor ajuste cuando el promedio de todas las rcm de cada caso fue el mínimo. La tabla 1 muestra las componentes incluidas en los casos y el C_d óptimo con el que se obtuvo el mejor ajuste para cada caso.

Para determinar la influencia de la variación del C_d en el balance energético, se diseñaron seis experimentos más, en los cuales se repite la simulación de cada caso con el C_d óptimo de los otros dos (ver tabla 1). En adelante, cuando se mencionen los diferentes casos se hace referencia a cada uno de ellos con su C_d óptimo, a menos que se especifique lo

Simulations

Three cases were chosen to study the dynamic and energetic behavior of the tide, each of which included different tidal constituents. The first case included only the M_2 (M2 case); the second, the two semidiurnal principal constituents (MS case); and the third, the seven most important constituents of the tide in the gulf ("Todos" case). In order to solve the different constituents with harmonic analyses, the duration of the simulations was 90 days for the first two cases and 370 days for the latter.

For each case, C_d was varied until obtaining the best fit between the results of the model and observations. A root mean square (rcm) was used as a measure of error or of the best fit, defined as

where O and M are the observed and modeled amplitudes, θ and ϕ are the observed and modeled phases, and N ($= 13$) is the number of tidal stations used to calibrate the model. The locations of the stations are shown in figure 1.

A rcm was obtained for each constituent of each case, and the best fit was defined as when the average of all the rcm of each case was the minimum. Table 1 shows the constituents included in the cases and the optimum C_d for which the best fit was obtained in each case.

In order to determine the influence of the variation of C_d on the energy balance, six more experiments were designed, in which the simulation of each case is repeated with the optimum C_d of the other two (see table 1). Hereafter, when the different cases are mentioned, each will be referred to with their

Tabla 1. Componentes incluidas en los casos. Se muestran los coeficientes de fricción (C_d) óptimos que se obtuvieron para cada caso y los experimentos que se llevaron a cabo.

Table 1. Constituents included in the cases. The optimum friction coefficients (C_d) obtained for each case and the experiments conducted are given.

Caso	Componente	C_d óptimo	Experimentos
M2	M_2	$C_{d1} = 0.0108$	C_{d2} C_{d3}
MS	M_2, S_2	$C_{d2} = 0.0081$	C_{d1} C_{d3}
“Todos”	$M_2, S_2, N_2, K_2, O_1, P_1, K_1$	$C_{d3} = 0.0079$	C_{d1} C_{d2}

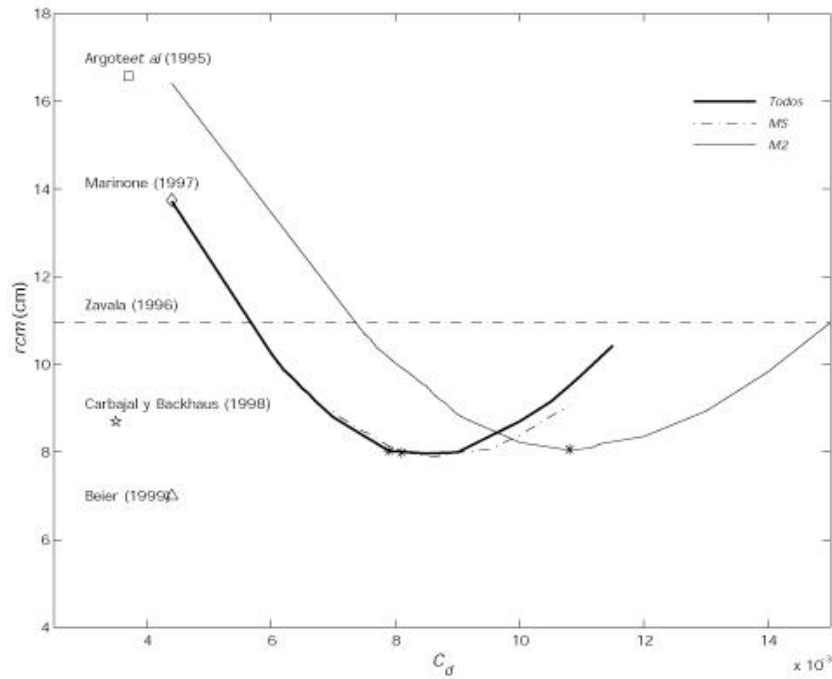


Figura 2. Error obtenido en función de C_d para la componente M_2 para todos los casos. Se muestran los errores obtenidos por otros autores con otros coeficientes.

Figure 2. Error obtained in terms of C_d for the M_2 constituent for all cases. Also shown are the errors obtained by other authors with different coefficients.

contrario. La mayoría de los resultados que se presentan en este trabajo pertenecen al caso “Todos”, debido a que es el que incluyó más componentes.

optimum C_d , unless the contrary is specified. Most of the results presented in this study pertain to the “Todos” case, since it is the one that included the most constituents.

MAREAS

La figura 2 muestra, para la M_2 , el valor de la rcm en función del C_d . Para todos los casos se puede apreciar que pequeñas variaciones del C_d óptimo producen que la rcm aumente. Es importante notar que el valor mínimo de la rcm fue similar entre los casos, sólo que para los casos M2 y MS, que incluyeron menos componentes, se necesitó un C_d mayor que el del caso "Todos". Por lo tanto, para todos los casos el ajuste de la M_2 fue similar, sólo que con diferente C_d . Los asteriscos indican la rcm que se obtiene con el C_d óptimo de cada caso. Sólo para el caso M2, el asterisco coincide con el valor mínimo de la rcm. En la figura también se muestran los errores que obtuvieron otros autores, de los cuales sólo Beier (1999) obtuvo un mejor ajuste que el de este trabajo. Argote *et al.* (1995), Marinone (1997), Carbajal y Backhaus (1998) y Beier (1999) utilizaron coeficientes de fricción menores que los de este trabajo, mientras que Zavala (1996) utilizó una parametrización lineal de la fricción. La rcm de Beier (1999) fue calculada a partir de los resultados de la figura 14 de su trabajo.

Para cada componente de cada simulación se calculó el error en las amplitudes (e_A) y el error en las fases (e_F) de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$e_A = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_i (O_i - M_i)^2 / 2\right)^{1/2}} \quad (11)$$

$$e_F = \left[\left(\frac{1}{N} \sum_i O_i^2 (\theta_i - \phi_i)^2 \right) / \left(\sum_i O_i^2 \right) \right] \quad (12)$$

donde el error en las amplitudes se calculó a partir de la diferencia entre las observaciones y los resultados del modelo, mientras que en las fases el error se calculó a partir de su diferencia, pero pesada por los valores de las amplitudes observadas. La tabla 2 muestra los errores obtenidos para cada componente de

TIDES

Figure 2 shows the rcm value for the M_2 as a function of C_d . It is observed in all cases that small variations of the optimum C_d cause rcm to increase. It is important to note that the minimum value of rcm was similar among cases, but for the M2 and MS cases, which included fewer constituents, a C_d higher than that of the "Todos" case was needed. Therefore, the fit of the M_2 was similar for all cases, but with a different C_d . The asterisks indicate the rcm obtained with the optimum C_d of each case. Only for the M2 case does the asterisk coincide with the minimum value of rcm. The figure also shows the errors obtained by other authors; only Beier (1999) obtained a better fit than that of this work. Argote *et al.* (1995), Marinone (1997), Carbajal and Backhaus (1998) and Beier (1999) used friction coefficients lower than those of this work, whereas Zavala (1996) used a linear parameterization of friction. The rcm of Beier (1999) was calculated from the results of figure 14 of that study.

For each constituent of each simulation, the error in the amplitudes (e_A) and the error in the phases (e_F) were calculated based on the following expressions:

where the error in the amplitudes was calculated from the difference between the observations and the results of the model, and the error in the phases was calculated from their difference, but weighted with the values of the amplitudes observed. Table 2 shows the errors obtained for each constituent

Tabla 2. Errores obtenidos para las componentes de los casos realizados. Las unidades del error en las amplitudes (e_A) y de la raíz cuadrática media (rcm) están en centímetros y las del error en las fases (e_F) en grados.

Table 2. Errors obtained for the constituents of the cases conducted. The units of error in the amplitudes (e_A) and of the root mean square (rcm) are in centimeters and those of the phase error (e_F) in degrees.

Caso	Componente	e_A	e_F	rcm	e_A	e_F	rcm	e_A	e_F	rcm
M2	M ₂	2.8	5.6	8.1	2.9	7.1	9.9	2.9	7.2	10.1
MS	M ₂	2.5	5.7	8.0	2.9	6.3	9.1	2.5	5.8	8.1
MS	S ₂	2.1	6.8	5.9	2.8	7.9	7.2	2.1	6.9	5.9
“Todos”	M ₂	2.5	5.7	8.0	3.0	6.6	9.5	2.5	5.7	8.0
“Todos”	S ₂	2.1	6.9	5.9	2.8	7.8	7.1	2.1	6.9	5.9
“Todos”	N ₂	0.6	5.5	2.0	1.0	9.9	3.6	0.6	5.7	2.1
“Todos”	K ₂	0.5	8.5	1.9	0.7	9.1	2.1	0.5	8.4	1.9
“Todos”	O ₁	1.1	4.5	2.2	1.1	5.4	2.4	1.1	4.6	2.2
“Todos”	P ₁	0.7	5.5	1.3	0.7	6.7	1.5	0.7	5.6	1.4
“Todos”	K ₁	1.4	4.1	3.0	1.4	5.0	3.3	1.4	4.1	3.0

cada caso. La presentación de los resultados de la tabla 2 corresponde al orden del número total de simulaciones de la tabla 1 (nueve simulaciones en total). En todos los casos, los resultados obtenidos con los coeficientes C_{d2} y C_{d3} son muy parecidos, debido a que la diferencia entre los coeficientes es pequeña. Al igual que la rcm, los valores de e_A y e_F entre los casos son parecidos para una misma componente. Por ejemplo, para la M₂ el valor de e_A oscila entre 2.5 y 2.8 cm, mientras que el de e_F oscila entre 5.6 y 5.7 grados (ver columnas 3 y 4 de la tabla 2). De igual forma, para la S₂, los valores son muy similares.

Una vez realizado el ajuste de la marea, se realizaron los mapas cotidales de las componentes de cada uno de los casos. Los mapas obtenidos (no mostrados) coinciden con los reportados a partir de observaciones (e.g., Filloux, 1973; Morales y Gutiérrez, 1989) y de

of each case. The presentation of the results of table 2 corresponds to the order of the total number of simulations of table 1 (nine simulations in total). In all cases, the results obtained with the C_{d2} and C_{d3} coefficients are very similar, because the difference between the coefficients is small. Similarly for the rcm, the values of e_A and e_F among the cases are similar for the same constituent. For example, the value of e_A for the M₂ oscillates between 2.5 and 2.8 cm, and that of e_F oscillates between 5.6 and 5.7 degrees (see columns 3 and 4 in table 2). Likewise, the values for the S₂ are very similar.

Once the fit of the tide was made, cotidal maps were made of the constituents of each of the cases. The maps obtained (not shown) coincide with those reported based on observations (e.g., Filloux, 1973; Morales and Gutiérrez, 1989) and similar numerical models

Tabla 3. Amplitudes y fases observadas (O y θ) y modeladas (M y ϕ) para la M_2 en el Golfo de California (caso “Todos”). Las amplitudes están en centímetros y las fases en grados con respecto a Greenwich.
Table 3. Amplitudes and phases observed (O and θ) and modeled (M and ϕ) for M_2 in the Gulf of California (“Todos” case). The amplitudes are in centimeters and the phases in degrees with respect to Greenwich.

Estación	O	θ	M	ϕ	$M-O$	$\phi-\theta$
1. San Felipe	164.5	64.9	168.0	71.4	3.5	6.5
2. Puerto Peñasco	157.0	58.6	159.0	58.9	2.0	0.3
3. Puerto Refugio	100.6	59.1	105.0	58.1	4.4	-1.0
4. Bahía de los Ángeles	65.6	58.7	71.7	57.3	6.1	-1.4
5. Isla Esteban	36.7	43.7	41.5	37.5	4.8	-6.2
6. San Francisquito	42.4	56.2	40.6	51.2	-1.8	-5.0
7. Isla Tiburón	36.5	24.4	39.4	26.1	2.9	1.7
8. Santa Rosalía	9.2	354.1	11.6	347.0	2.4	-7.1
9. Guaymas	13.5	315.8	16.6	322.0	3.1	6.2
10. Loreto	14.5	275.8	15.4	281.0	0.9	5.2
11. Yavaros	20.4	296.3	22.1	287.0	1.7	-9.3
12. La Paz	23.7	274.9	27.5	270.0	3.8	-4.9
13. Topolobampo	29.3	297.9	24.7	263.0	-4.6	-34.9

modelos numéricos similares (e.g., Argote *et al.*, 1995; Marinone, 1997). En García-Silva (1999) se pueden consultar los mapas cotidales de las componentes del caso “Todos”. La tabla 3 muestra las amplitudes y fases modeladas y observadas para la componente M_2 del caso “Todos”. Los resultados se muestran en las estaciones mareográficas usadas para calibrar el modelo (ver figura 1 para la ubicación de las estaciones). En la tabla se puede apreciar que, en general, las diferencias entre los valores modelados y observados son pequeñas, excepto en Topolobampo, donde la diferencia de las fases fue más significativa (probablemente por estar la estación mareográfica dentro del interior del estuario). En la tabla 4 se muestra el

(e.g., Argote *et al.*, 1995; Marinone, 1997). Cotidal maps of the constituents of the “Todos” case can be found in García-Silva (1999). Table 3 shows the modeled and observed amplitudes and phases for the M_2 constituent of the “Todos” case. The results are shown in the tidal stations used to calibrate the model (see figure 1 for the locations of the stations). The table shows that, in general, the differences between the modeled and observed values are small, except at Topolobampo, where the difference in the phases was more significant (probably because the tidal station is in the interior of the estuary). Table 4 shows the average of the differences among the stations

Tabla 4. Promedio (\bar{x}) y desviación estándar (σ) de las diferencias de amplitudes y fases entre las estaciones para todos los casos. Los promedios de las amplitudes están en centímetros y las desviaciones estándar de las fases en grados.

Table 4. Average (\bar{x}) and standard deviation (σ) of the differences in amplitudes and phases among the stations for all cases. The averages of the amplitudes are in centimeters and the standard deviations of the phases in degrees.

Caso	Componente	\bar{x} ($M-O$)	σ ($M-O$)	\bar{x} ($\phi-\theta$)	σ ($\phi-\theta$)
M2	M_2	2.7	3.0	-4.3	10.7
MS	M_2	2.1	2.8	-3.8	10.7
MS	S_2	0.3	3.1	-2.3	12.0
“Todos”	M_2	2.2	2.8	-3.8	10.7
“Todos”	S_2	0.2	3.0	-2.0	11.8
“Todos”	N_2	0.4	0.7	-8.3	11.1
“Todos”	K_2	0.2	0.8	-0.8	12.7
“Todos”	O_1	-1.3	0.9	0.9	4.5
“Todos”	P_1	-0.7	0.7	-0.1	6.0
“Todos”	K_1	-1.4	1.3	0.4	4.2

promedio de las diferencias entre las estaciones y su desviación estándar para todas las componentes de todos los casos. Para las amplitudes, el promedio y la desviación estándar fue pequeño para la mayoría de las componentes, excepto el promedio de la M_2 y la desviación estándar de la M_2 y la S_2 , probablemente porque estas componentes son las que presentan mayor amplitud en el golfo. Para las fases, los promedios fueron pequeños para todas las componentes excepto para la N_2 ; en cambio, la desviación estándar fue mayor para todas las componentes semidiurnas debido a que éstas presentan un cambio de fase en la parte central del golfo, mientras que las diurnas prácticamente están en fase a lo largo de él. Los promedios y desviaciones estándar de la M_2 y S_2 son similares entre los casos. Aun así, con los casos MS y “Todos” se obtuvieron los mejores ajustes para la M_2 y S_2 , respectivamente. En

and the standard deviation for all the constituents of all cases. The average and standard deviation of the amplitudes was small for most of the constituents, except for the average of the M_2 and the standard deviation of the M_2 and the S_2 , probably because these constituents present greater amplitude in the gulf. The averages of the phases were small for all the constituents, except for N_2 ; on the other hand, the standard deviation was greater for all the semidiurnal constituents because they present a change in phase in the central part of the gulf, whereas the diurnal ones are practically in phase throughout the gulf. The averages and standard deviations of the M_2 and the S_2 are similar among the cases. Even so, the best fits of the MS and “Todos” cases were obtained for the M_2 and the S_2 , respectively. The modeled amplitudes and phases of the other constituents of the “Todos” case can

García-Silva (1999) se pueden consultar las amplitudes y fases modeladas de las demás componentes del caso "Todos". En este trabajo se considera que el modelado de la marea en el golfo fue satisfactorio para todas las componentes.

BALANCE DE MOMENTO

Para identificar las fuerzas más importantes de la marea en el golfo, todos los términos de las ecuaciones de momento fueron evaluados, filtrados y promediados en el tiempo. El filtro que se utilizó remueve los movimientos con periodos menores de dos días, lo cual es suficiente para eliminar las frecuencias altas. Más información sobre el filtro se puede encontrar en Marinone (1997). Los campos instantáneos de los términos son los campos totales, los campos filtrados son los campos residuales y los campos de marea se obtuvieron a partir de la diferencia de los campos totales y residuales. En este trabajo los campos residuales se definen como la parte del flujo que queda después de que los campos de marea han sido filtrados. Se componen de un promedio y de una fluctuación.

La figura 3 muestra las series de tiempo de los términos de las ecuaciones (1) y (2) para el Alto Golfo, Canal de Ballenas y sur del golfo. Se muestran los campos residuales para el caso "Todos". En el Alto Golfo, en la dirección transversal (en adelante dirección u) no existe un balance claro entre los términos, pero principalmente se da entre el gradiente de presión, Coriolis y la fricción; en cambio, en la dirección longitudinal (en adelante dirección v) hay un balance bien definido entre el gradiente de presión y la fricción. En el Canal de Ballenas, Coriolis y la advección balancean al gradiente de presión, a la viscosidad y a la fricción en u , mientras que en v , Coriolis y la advección están en balance con el gradiente de presión. En el sur del golfo el balance principal es geostrofico

be found in García-Silva (1999). In this study, it is considered that the modeling of the tide in the gulf was satisfactory for all the constituents.

MOMENTUM BALANCE

In order to identify the most important tidal forces in the Gulf of California, all the terms of the momentum equations were evaluated, filtered and averaged in time. The filter used removes the movements with periods shorter than two days, which is sufficient to eliminate the high frequencies. More information on the filter can be found in Marinone (1997). The instantaneous fields of the terms are the total fields, the filtered fields are the residual fields and the tidal fields were obtained from the difference between the total and residual fields. In this study, the residual fields are defined as the portion of flow that remains after the tidal fields have been filtered. They consist of an average and a fluctuation component.

Figure 3 shows the time series of the terms of equations (1) and (2) for the Upper Gulf, Ballenas Channel and the southern gulf. The residual fields for the "Todos" case are shown. In the transversal direction (hereafter direction u) in the Upper Gulf there is no clear balance between the terms; it occurs mainly between the pressure gradient, Coriolis and friction. On the other hand, in the longitudinal direction (hereafter direction v) there is a well-defined balance between the pressure gradient and friction. In Ballenas Channel, Coriolis and advection balance with the pressure gradient, viscosity and friction in u , whereas Coriolis and advection are in balance with the pressure gradient in v . In the southern gulf, the principal balance is

en ambas direcciones. Las series de tiempo de esta figura son señales de frecuencia baja producidas por las interacciones no lineales de las componentes de marea.

Para comparar cómo es el balance de marea con respecto al residual, la figura 4 muestra las series de tiempo de los campos de marea para los mismos puntos que la figura anterior. En el Alto Golfo, el gradiente de presión es balanceado por Coriolis y la fricción en u y únicamente por la fricción en v . En el Canal de Ballenas y en el sur del golfo el balance es geostrofico en u , mientras que en v el gradiente de presión no está balanceado por ninguna fuerza (el término que está en balance con el gradiente de presión es $\partial v/\partial t$). Note que los campos de marea son uno o dos órdenes de magnitud mayor que los campos residuales y que las escalas en el tiempo no son las mismas.

Las figuras 5 y 6 muestran los promedios temporales de los términos de las ecuaciones de momento para u y v , respectivamente (S_u y S_v son la suma de fuerzas, es decir, $S_u = \partial u/\partial t$ y $S_v = \partial v/\partial t$). Se muestran los campos residuales para el caso “Todos”. En estas figuras se pueden apreciar claramente las regiones donde los términos son importantes. Tanto para u como para v , las regiones de mayor actividad o donde las fuerzas son mayores son el Alto Golfo y la zona de las grandes islas (en adelante archipiélago). En ambas direcciones se puede apreciar que los términos están en balance unos con otros. Por ejemplo, en el Alto Golfo en la dirección v , la fricción está en balance con el gradiente de presión y la advección, mientras que en la zona de los umbrales la advección y el gradiente de presión están en balance. En ambas direcciones se puede apreciar que en el sur del golfo el balance es geostrofico y que la viscosidad sólo es importante en el archipiélago. S_u y S_v son grandes principalmente en la región norte, en el archipiélago y a lo largo de la costa del golfo.

geostrophic in both directions. The time series of this figure are the low frequency signals produced by the nonlinear interactions of the tidal constituents.

In order to compare how the tidal balance is with respect to the residual, figure 4 shows the time series of the tidal fields for the same points of the previous figure. In the Upper Gulf, the pressure gradient is balanced by Coriolis and friction in u and only by friction in v . In Ballenas Channel and in the southern gulf, the balance is geostrophic in u , whereas the pressure gradient is not balanced by any force in v (the term that is balanced with the pressure gradient is $\partial v/\partial t$). Note that the tidal fields are one or two orders of magnitude greater than the residual fields and that the time scales are not the same.

Figures 5 and 6 show the temporal averages of the terms of the momentum equations for u and v , respectively (S_u and S_v are the sum of the forces, that is $S_u = \partial u/\partial t$ and $S_v = \partial v/\partial t$). The residual fields are shown for the “Todos” case. These figures clearly illustrate the regions where the terms are important. For both u and v , the regions of greatest activity or where the forces are greater are the Upper Gulf and the area of the large islands (hereafter, archipelago). It can be seen that the terms are balanced some with others in both directions. For example, in the Upper Gulf in direction v , friction is balanced with the pressure gradient and advection, whereas in the sill zone, advection and the pressure gradient are balanced. In both directions in the southern gulf, the balance is geostrophic and viscosity is only important in the archipelago. S_u and S_v are large, mainly in the northern region, the archipelago and along the coast of the gulf.

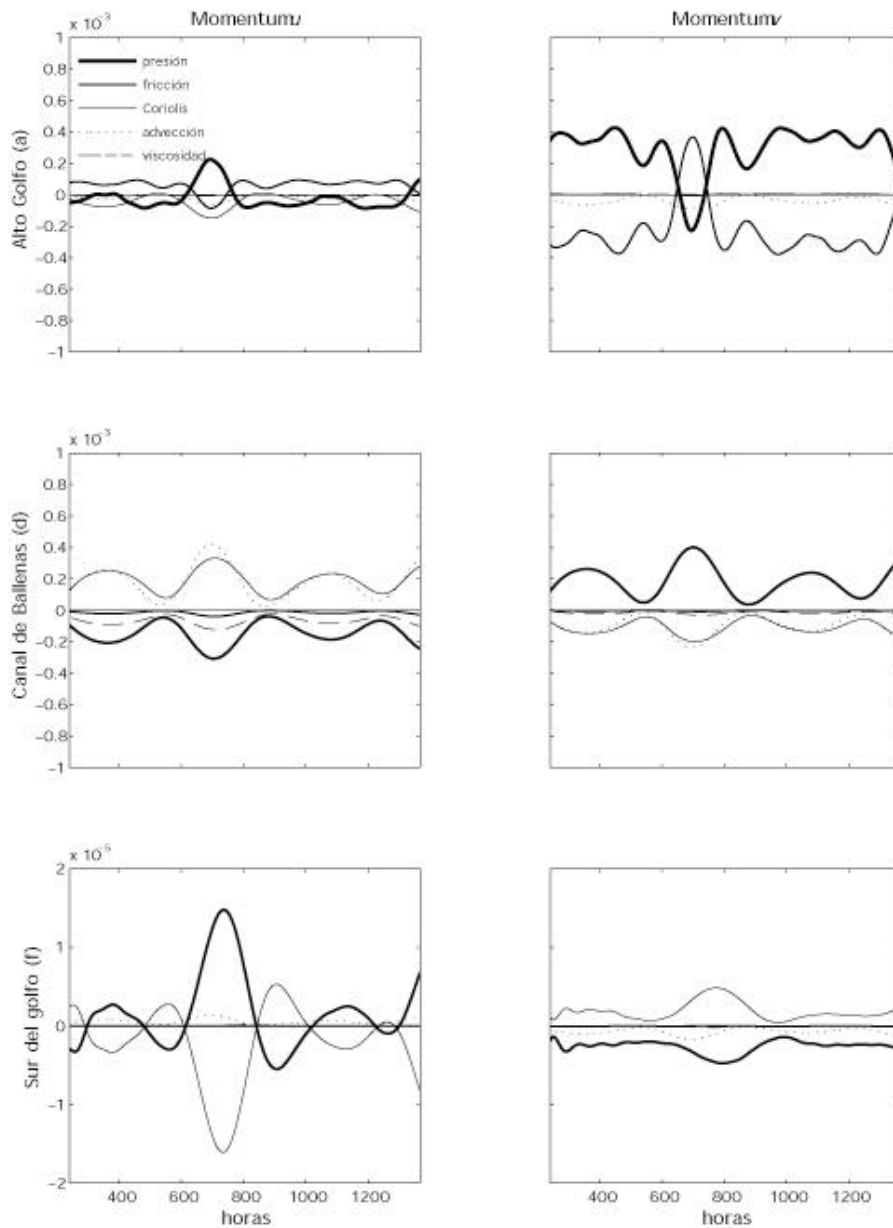


Figura 3. Series de tiempo de los campos residuales de las ecuaciones de momento para tres puntos de malla (caso “Todos”). Las unidades están en cm s^{-2} .

Figure 3. Time series of the residual fields of the momentum equations for three grid points (“Todos” case). The units are in cm s^{-2} .

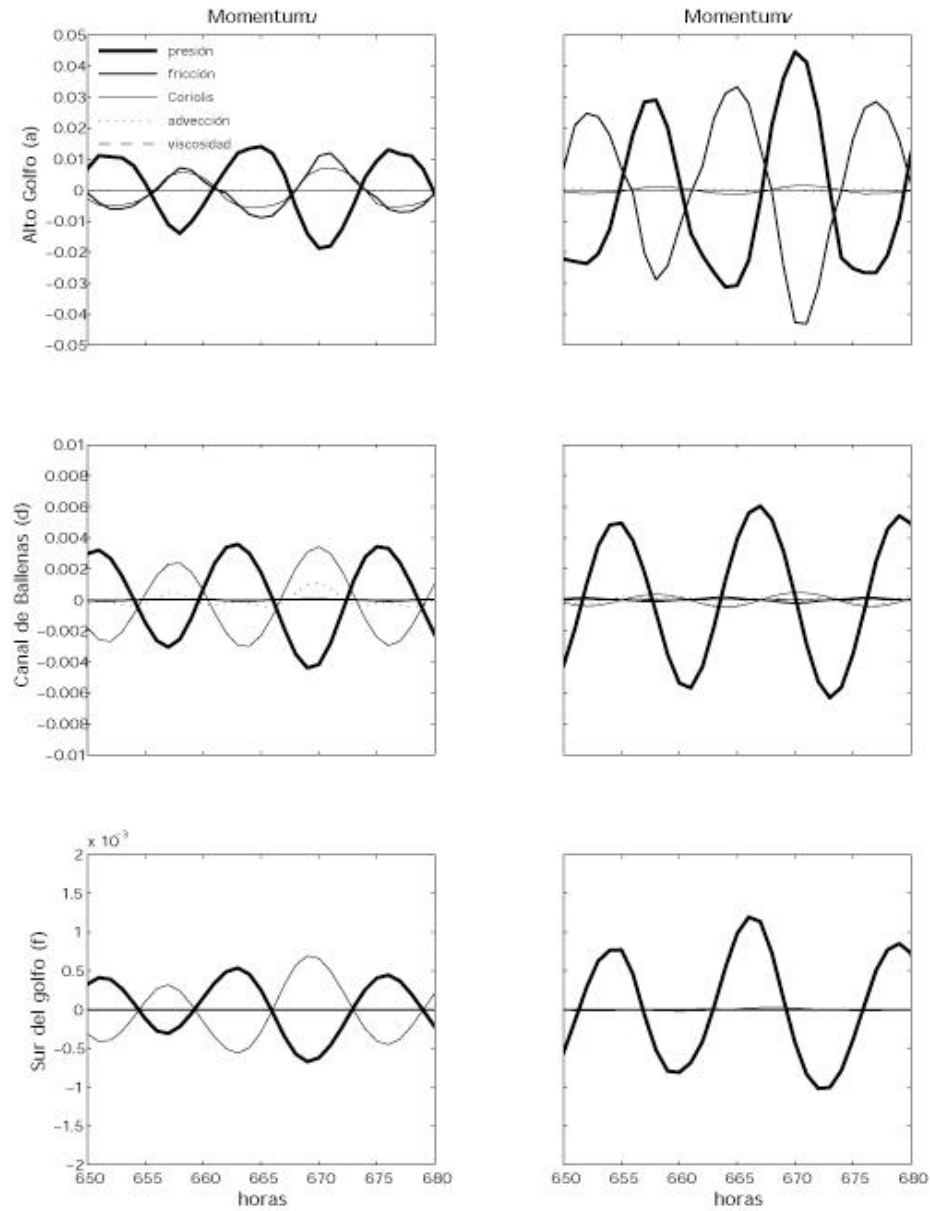


Figura 4. Series de tiempo de los campos de marea de las ecuaciones de momento para tres puntos de malla (caso “Todos”). Las unidades están en cm s^{-2} .
Figure 4. Time series of the tidal fields of the momentum equations for three grid points (“Todos” case). The units are in cm s^{-2} .

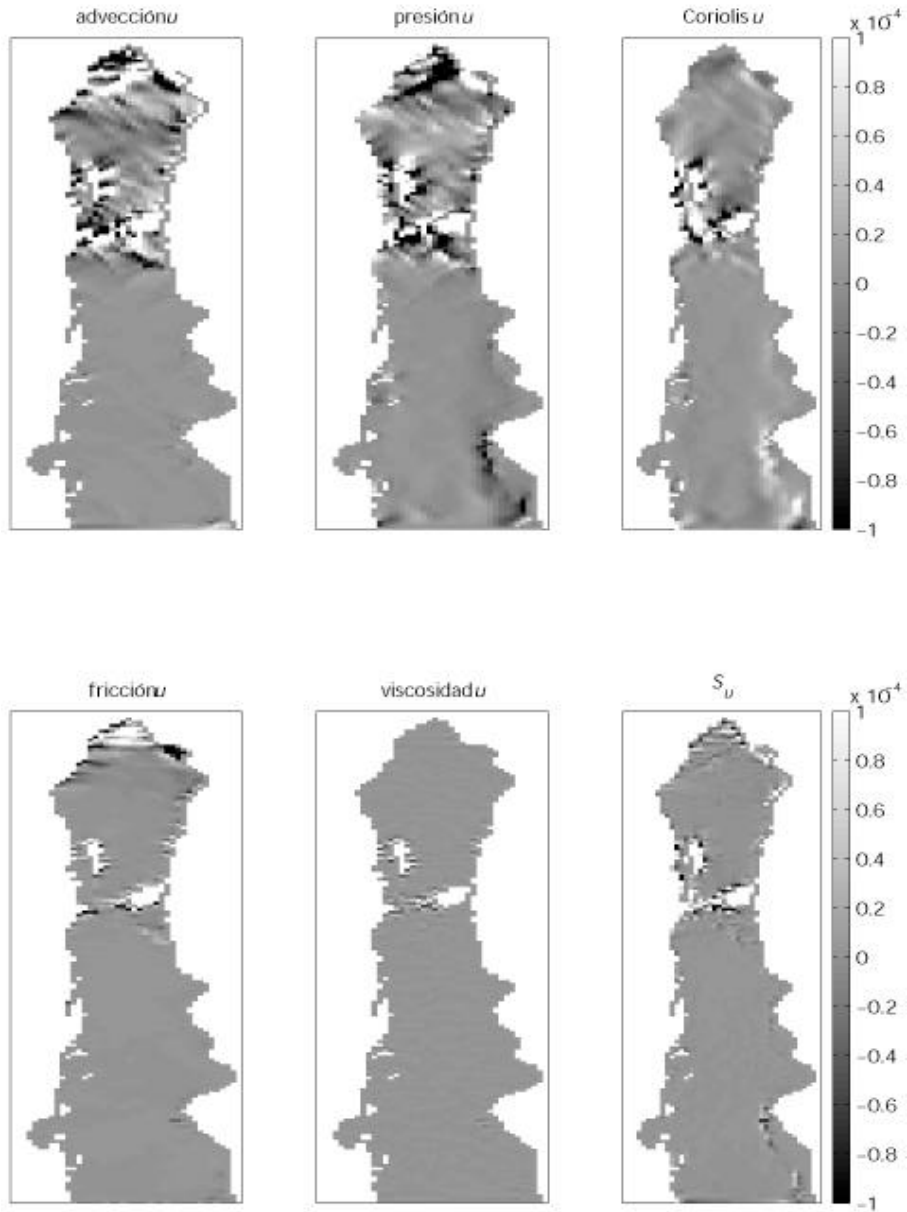


Figura 5. Promedios temporales de los campos residuales de la ecuación de momento en u para el caso “Todos”. Las unidades están en cm s^{-2} .

Figure 5. Temporal averages of the residual fields of the momentum equation in u for the “Todos” case. The units are in cm s^{-2} .

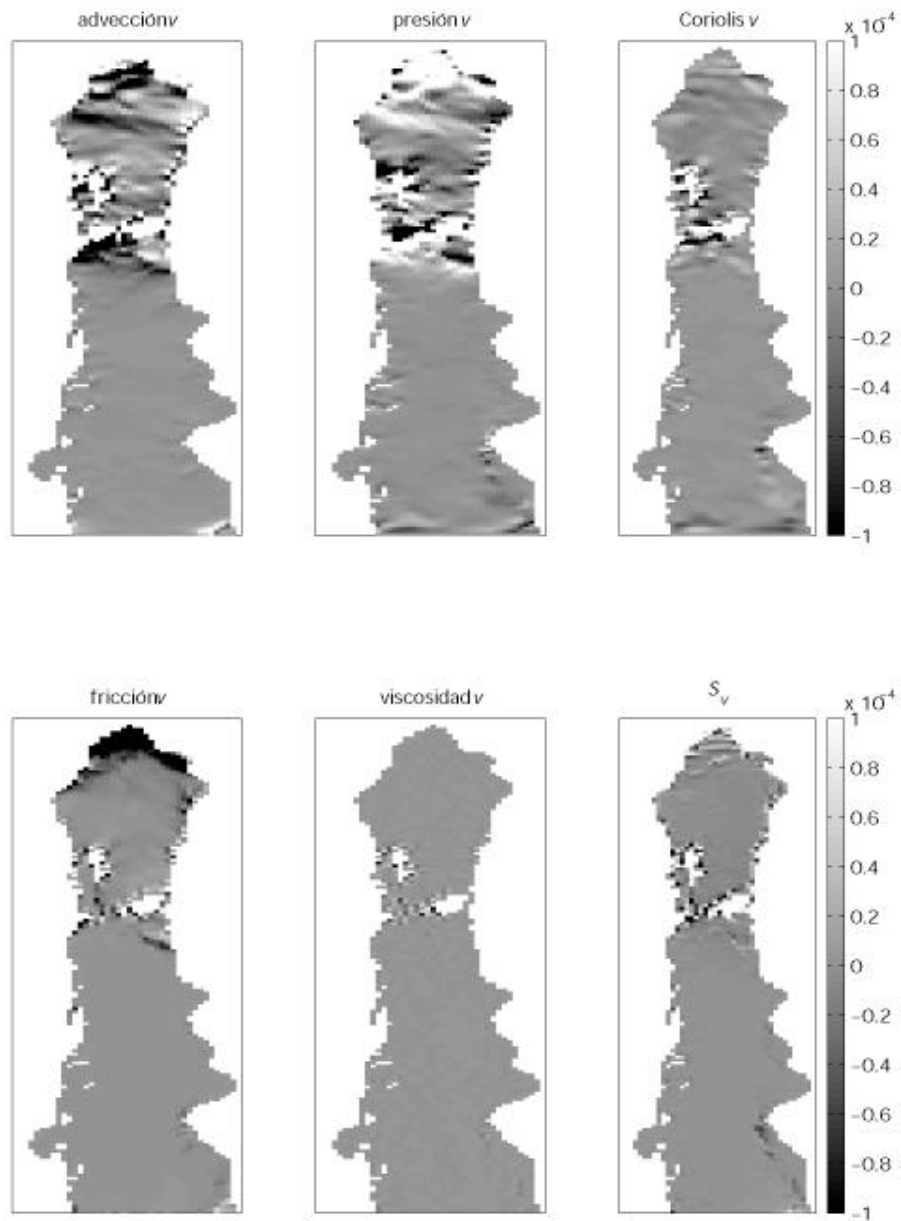


Figura 6. Promedios temporales de los campos residuales de la ecuación de momento en v para el caso “Todos”. Las unidades están en cm s^{-2} .

Figure 6. Temporal averages of the residual fields of the momentum equation in v for the “Todos” case. The units are in cm s^{-2} .

La suma de fuerzas S_u y S_v son diferentes de cero y nos indican las regiones donde se presentan errores. Para comparar qué tan grandes son estos errores asociados con el balance de momento, se calculó el error relativo ϵ en la dirección u , definido como

$$\epsilon_u = S_u/N_u \quad (13)$$

donde

$$N_u = |u \partial u/\partial x| + |v \partial u/\partial y| + |fv| + |g \partial \eta/\partial x| + \left| C_d u(u^2 + v^2)^{1/2} H^{-1} \right| + |A \nabla^2 u| \quad (14)$$

es una norma. De igual forma se calculó el error relativo ϵ en la dirección v . Los promedios muestran errores grandes en el balance, pero esto se debe básicamente a que se están promediando términos que tienen fluctuaciones muy grandes (las fluctuaciones de los campos de marea son uno o dos órdenes de magnitud mayor que las fluctuaciones de los residuales).

Para comparar el tamaño de los términos de las ecuaciones de momento al aumentar el número de componentes de marea, la tabla 5 muestra los promedios temporales de los campos residuales para todos los casos (C_{d3}). Los promedios están integrados en todo el golfo. En u los promedios de advección, Coriolis y viscosidad prácticamente no presentaron cambios entre los casos, mientras que los promedios de presión y fricción disminuyeron al aumentar el número de componentes. En v los promedios de advección, presión y fricción fueron los que aumentaron notoriamente entre los casos. El error en u y en v fue menor para el caso M2 que para los otros casos. La mayoría de los promedios del caso M2 son mayores o iguales que los promedios del caso MS, lo que indica que no necesariamente los promedios tienen que aumentar al incrementarse el número de componentes. Lo anterior se puede observar en la norma, la cual muestra que no aumentó significativamente la cantidad de momento en el

The sum of the forces S_u and S_v is different from zero and indicates the regions where there are errors. In order to compare how large the errors associated with the momentum balance are, the error relative to ϵ in direction u was calculated as

where

is a norm. Likewise, the error relative to ϵ in direction v was also calculated. The averages show large errors in the balance, but this is because we are averaging terms that have very large fluctuations (the fluctuations in the tidal fields are one or two orders of magnitude higher than the fluctuations of the residuals).

In order to compare the size of the terms of the momentum equations upon increasing the number of tidal constituents, table 5 shows the temporal averages of the residual fields for all cases (C_{d3}). The averages are integrated in the entire gulf. In u , the averages of advection, Coriolis and viscosity do not present changes among the cases, whereas the averages of pressure and friction decrease as the number of constituents increases. In v , the averages of advection, pressure and friction increase notably among the cases. The error in u and in v were lower for the M2 case than for the other cases. Most of the averages of the M2 case are higher or equal to the averages of the MS case, indicating that the averages do not necessarily increase as the number of constituents increases. This can be observed in the norm, which did not significantly increase the amount of momentum in the gulf when the number of constituents increased. Only the norm of

Tabla 5. Promedios temporales de los campos residuales de las ecuaciones de momento para todos los casos (C_{d3}). Los promedios están integrados en todo el golfo. Las unidades están en 10^{-2} cm s $^{-2}$.**Table 5.** Temporal averages of the residual fields of the momentum equations for all cases (C_{d3}). The averages are integrated in all the gulf. The units are in 10^{-2} cm s $^{-2}$.

	Advección	Presión	Coriolis	Fricción	Viscosidad	Norma	ϵ
Momento u							
M2	0.10	-0.92	0.99	0.19	0.01	2.21	0.16
MS	0.10	-0.83	0.98	0.18	0.01	2.09	0.21
“Todos”	0.11	-0.75	1.02	0.04	0.01	1.92	0.22
Momento v							
M2	0.37	3.25	-0.06	-3.93	-0.02	7.63	-0.05
MS	0.48	3.03	-0.06	-3.87	-0.02	7.45	-0.06
“Todos”	0.58	3.82	-0.08	-5.14	-0.01	9.63	-0.09

golfo al incrementar el número de componentes. Sólo la norma del caso “Todos” en la dirección v no disminuyó con respecto a la norma del caso M2, debido a que el incremento de componentes fue considerable del caso M2 (1) al caso “Todos” (7). Por lo tanto, no toda la energía adicional que entra al golfo al incrementar el número de componentes de marea se transfiere al promedio, sino que gran parte de esta energía se transfiere a frecuencias bajas, como se observó en la figura 3. Marinone (1997) mostró resultados similares pero para las corrientes residuales de la región norte del golfo. En su caso, la rcm de las magnitudes de velocidad de las corrientes no disminuyó al aumentar el número de componentes, pero tampoco aumentó considerablemente.

BALANCE ENERGÉTICO

Al igual que cada uno de los términos de las ecuaciones de momento, los términos de la ecuación de energía fueron evaluados, filtrados y promediados en el tiempo. De la misma

the “Todos” case in direction v did not decrease with respect to the norm of the M2 case, because the increase in constituents was considerable from the M2 case (1) to the “Todos” case (7). Therefore, not all the additional energy that enters the gulf by increasing the number of tidal constituents is transferred to the mean, but rather a large part of this energy is transferred to low frequencies, as is observed in figure 3. Marinone (1997) reported similar results for the residual currents of the northern region of the gulf; in that case, the rcm of the current velocity magnitudes did not decrease as the number of constituents increased, but it did not increase considerably either.

ENERGY BALANCE

As with each of the terms of the momentum equations, the terms of the energy equation were also evaluated, filtered and averaged in time. Similar to the momentum

forma que en el balance de momento, los campos de marea se obtuvieron restando a los campos totales los campos residuales, es decir, $E' = E^t - E$, $D_f' = D_f^t - D_f$, $\nabla \cdot Q' = \nabla \cdot Q^t - \nabla \cdot Q$ y $D_v' = D_v^t - D_v$. Los superíndices ' y ^t indican los campos de marea y totales, respectivamente.

La figura 7 muestra la evolución temporal de $\langle D_f \rangle$ y $\langle \nabla \cdot Q \rangle$ para todos los casos (no se muestra $\langle D_v \rangle$ debido a que es despreciable con respecto a $\langle D_f \rangle$ y $\langle \nabla \cdot Q \rangle$). Los resultados están integrados en las áreas I y II, y en todo el golfo (las áreas I y II se muestran en la figura 1). Para todos los casos y en todas las regiones se puede apreciar el excelente balance que existe entre $\langle D_f \rangle$ y $\langle \nabla \cdot Q \rangle$. También se puede observar que el área I es más energética que el área II. Cuando se incluyen simultáneamente varias componentes en una simulación surgen fluctuaciones debido a las interacciones no lineales. Para el caso MS se observa claramente una fluctuación quincenal y para el caso "Todos" una fluctuación quincenal y una mensual. Para el caso M2 no se presentó ninguna fluctuación debido a que este caso sólo incluyó una componente. Mientras más componentes se incluyen en una simulación, más grande es la fluctuación y, por lo tanto, hay más transferencia de energía a frecuencias bajas. Estas series de tiempo son similares a las que Marinone (1997) muestra para todo el golfo.

La figura 8 muestra la evolución temporal de $\langle D_f' \rangle$, $\langle D_f \rangle$, F' , F , $\langle D_v' \rangle$ y $\langle D_v \rangle$ para el caso "Todos". Se puede apreciar que los campos residuales siguen la secuencia de los campos de marea, es decir, son del mismo orden. En esta figura se pueden apreciar las fluctuaciones tanto para los campos de marea como para los residuales. Es importante notar que la escala de la disipación viscosa es mucho menor, por lo que la pérdida de energía que se da por esta vía es mínima.

La figura 9 muestra la distribución espacial de los promedios temporales de D_f , $\nabla \cdot Q$, D_v y

balance, the tidal fields were obtained by subtracting the residual fields from the total fields, that is, $E' = E^t - E$, $D_f' = D_f^t - D_f$, $\nabla \cdot Q' = \nabla \cdot Q^t - \nabla \cdot Q$ and $D_v' = D_v^t - D_v$. The supercripts ' and ^t indicate the tidal and total fields, respectively.

Figure 7 shows the temporal evolution of $\langle D_f \rangle$ and $\langle \nabla \cdot Q \rangle$ for all cases ($\langle D_v \rangle$ is not shown because it is insignificant with respect to $\langle D_f \rangle$ and $\langle \nabla \cdot Q \rangle$). The results are integrated in areas I and II, and in the entire gulf (areas I and II are shown in figure 1). The excellent balance that exists between $\langle D_f \rangle$ and $\langle \nabla \cdot Q \rangle$ can be observed for all cases in all regions. Furthermore, area I is more energetic than area II. When various constituents are included simultaneously in one simulation, many fluctuations occur due to the nonlinear interactions. A fortnightly fluctuation is clearly observed for the MS case and a fortnightly and monthly fluctuation for the "Todos" case. No fluctuation occurred for the M2 case, because this case included only one constituent. The more constituents included in a simulation, the larger the fluctuation and, therefore, there is a greater transfer of energy to the low frequencies. These time series are similar to those presented by Marinone (1997) for the entire gulf.

Figure 8 shows the temporal evolution of $\langle D_f' \rangle$, $\langle D_f \rangle$, F' , F , $\langle D_v' \rangle$ and $\langle D_v \rangle$ for the "Todos" case. The residual fields follow the sequence of the tidal fields, that is, they are of the same order. This figure illustrates the fluctuations for both the tidal and residual fields. It is important to note that the scale of the viscous dissipation is much lower and, therefore, the loss of energy resulting from this route is minimum.

Figure 9 shows the spatial distribution of the temporal averages of D_f , $\nabla \cdot Q$, D_v and S_E for the "Todos" case (S_E is the sum of the terms

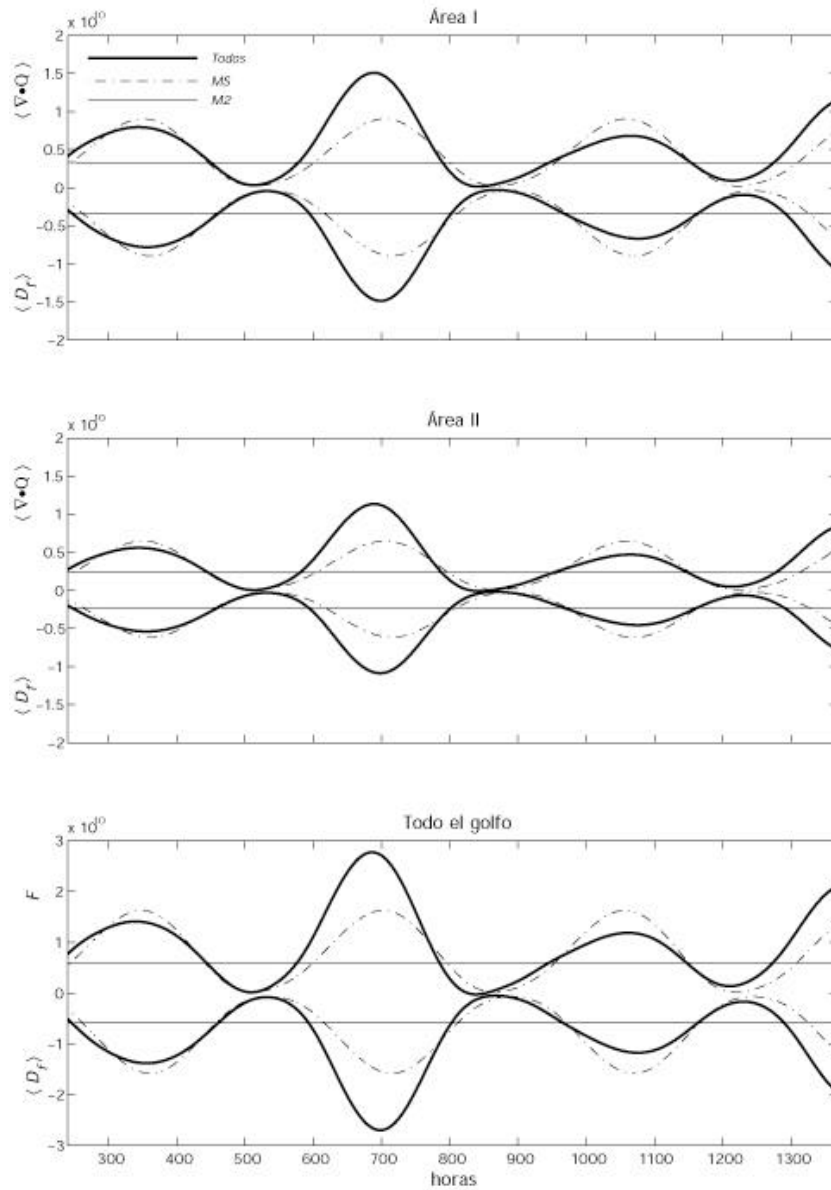


Figura 7. Series de tiempo de los campos residuales de la disipación de energía por fricción de fondo y del flujo de energía para las áreas I y II, y todo el golfo. Se muestran los resultados para todos los casos. Las unidades están en watts.

Figure 7. Time series of the residual fields of the energy dissipation due to bottom friction and of the flow of energy for areas I and II, and the entire gulf. The results for all the cases are shown. The units are in watts.

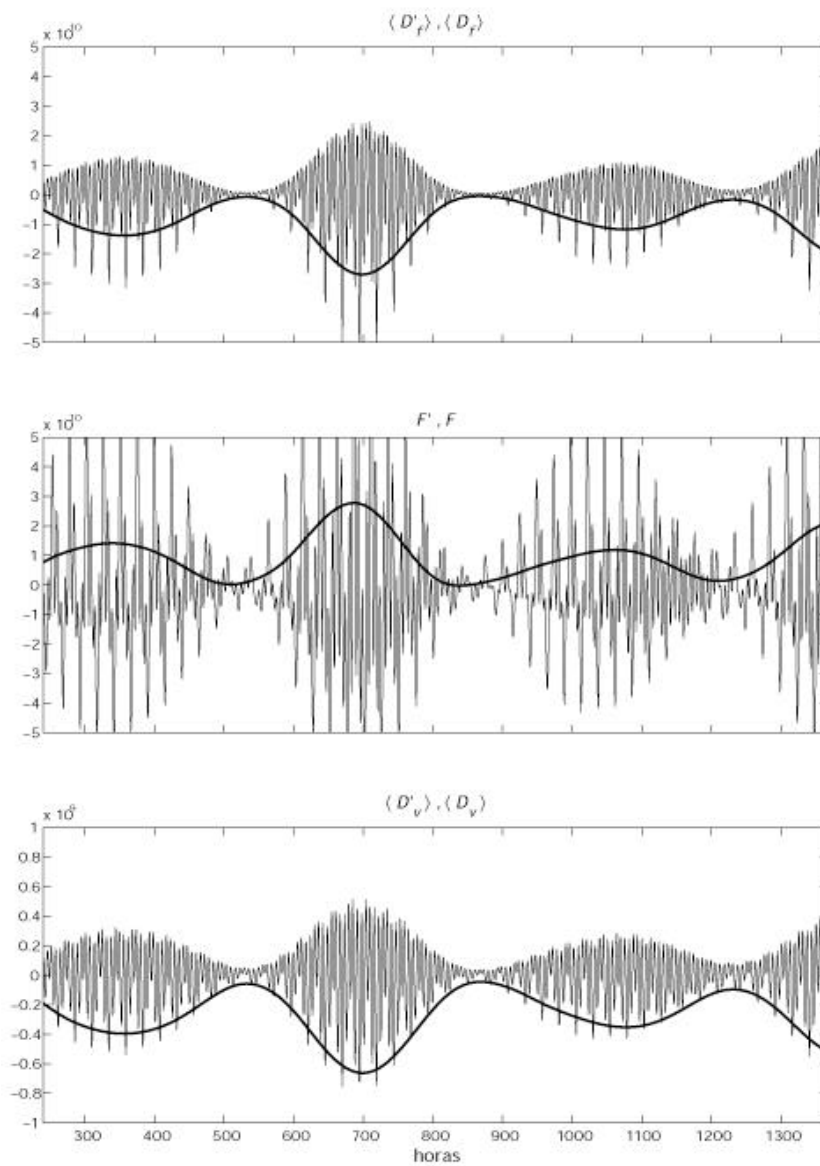


Figura 8. Series de tiempo de la disipación de energía por fricción de fondo, del flujo de energía y de la disipación viscosa para el caso “Todos”. Se muestran los campos de marea y residuales. Las unidades están en watts.

Figure 8. Time series of the energy dissipation due to bottom friction, of the energy flow and of the viscous dissipation for the “Todos” case. The tidal and residual fields are shown. The units are in watts.

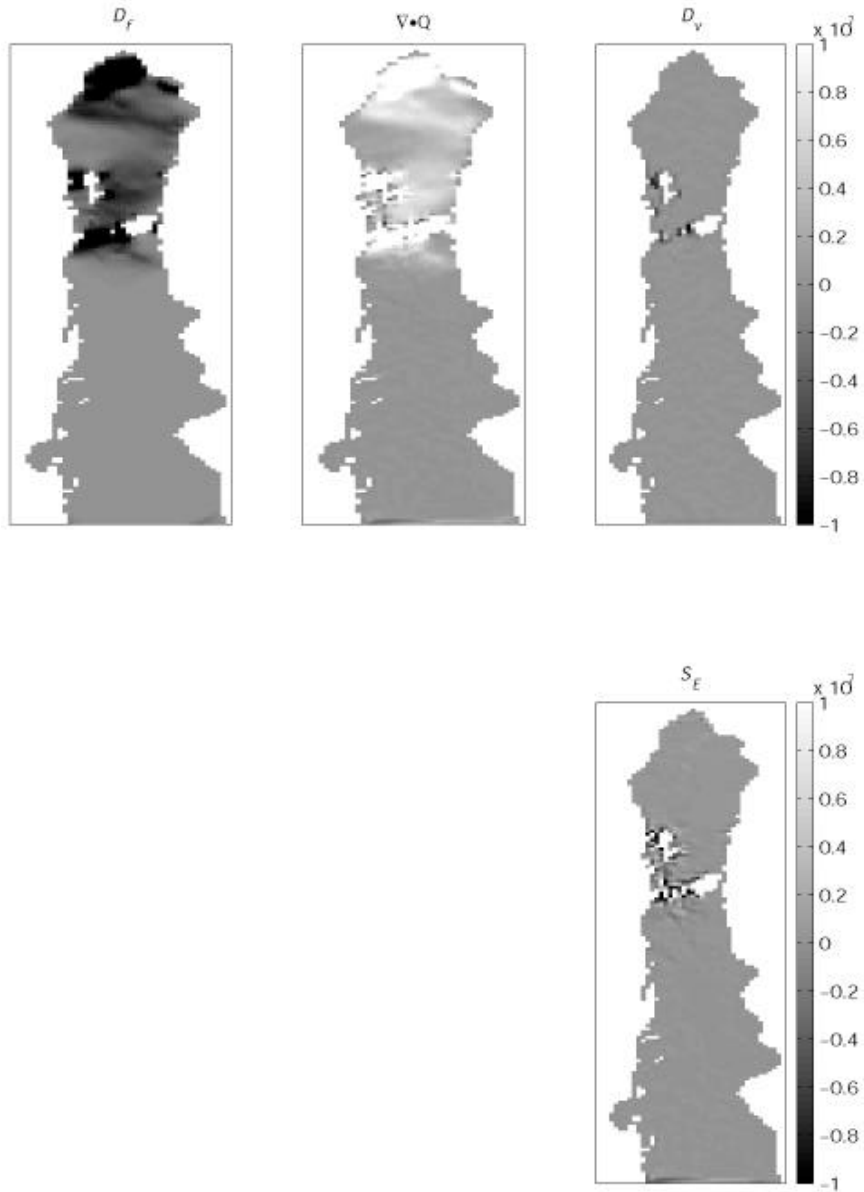


Figura 9. Promedios temporales de los campos residuales de la ecuación de energía para el caso “Todos”. Las unidades están en watts.

Figure 9. Temporal averages of the residual fields of the energy equation for the “Todos” case. The units are in watts.

S_E para el caso "Todos" (S_E es la suma de términos de la ecuación de energía, es decir, $S_E = \partial E/\partial t$). Al igual que en la figura 7, se puede observar el balance que existe entre D_f y $\nabla \cdot Q$ en todo el golfo. D_f es importante en la región norte y en el archipiélago, principalmente en el Alto Golfo, en Bahía Adair, en el Canal de Ballenas y alrededor de los umbrales de San Lorenzo y San Esteban. En la Cuenca del Delfín, D_f es pequeño debido a que es la región de mayor profundidad del área I. D_v únicamente es importante en el archipiélago, donde las corrientes de marea son fuertes y los flujos se aceleran debido a la presencia de las islas. S_E nos indica que el balance energético fue bueno en todo el golfo excepto en el archipiélago. La distribución espacial de D_f es similar a la reportada por Argote *et al.* (1995) y Carbajal y Backhaus (1998). En la figura 1 se muestra la ubicación del Alto Golfo, de Bahía Adair, de la Cuenca del Delfín y de la zona de los umbrales de San Lorenzo y San Esteban.

Otra forma de apreciar el efecto de haber incluido más componentes se observa en la figura 10. En ella se muestra la integración lateral de los términos de la ecuación de energía para todos los casos. Se puede observar que la inclusión de más componentes incrementó la cantidad de energía en el golfo. La vista lateral nos muestra claramente las regiones donde se disipa la mayor parte de la energía, así como el excelente balance que existe entre $\langle D_f \rangle$ y $\langle \nabla \cdot Q \rangle$. $\langle D_v \rangle$ sólo es importante en el archipiélago (notar que la escala de $\langle D_v \rangle$ es un orden de magnitud menor). Nuevamente, la estructura lateral de $\langle D_f \rangle$ para todos los casos coincide con la reportada por Argote *et al.* (1995) para la M_2 .

De igual forma que en el balance de momento, se calculó el error relativo del balance energético, ϵ_E , definido como

of the energy equation, that is, $S_E = \partial E/\partial t$). As in figure 7, this figure shows the existing balance between D_f and $\nabla \cdot Q$ in the entire gulf. D_f is important in the northern region and in the archipelago, mainly in the Upper Gulf, Adair Bay, Ballenas Channel and around the San Lorenzo and San Esteban sills. In Delfín Basin, D_f is small because this is the deepest region of area I. D_v is only important in the archipelago, where the tidal currents are strong and the flows accelerate due to the presence of the islands. S_E indicates that the energy balance was good in the entire gulf, except in the archipelago. The spatial distribution of D_f is similar to that reported by Argote *et al.* (1995) and Carbajal and Backhaus (1998). Figure 1 shows the location of the Upper Gulf, Adair Bay, Delfín Basin and the sill zone of San Lorenzo and San Esteban.

Another way to appreciate the effect of having included more constituents is observed in figure 10. Here, the lateral integration of the terms of the energy equation is shown for all cases. It is observed that the inclusion of more constituents increases the amount of energy in the gulf. The lateral view clearly shows the regions where most of the energy dissipates, as well as the excellent balance that exists between $\langle D_f \rangle$ and $\langle \nabla \cdot Q \rangle$. $\langle D_v \rangle$ is only important in the archipelago (note that the scale of $\langle D_v \rangle$ is one order of magnitude lower). Again, the lateral structure of $\langle D_f \rangle$ for all cases coincides with that reported by Argote *et al.* (1995) for the M_2 .

As in the momentum balance, the error relative to the energy balance ϵ_E was calculated as

$$\epsilon_E = S_E/N_E \quad (15)$$

donde

$$N_E = |D_f| + |\nabla \cdot Q| + |D_v| \quad (16)$$

es una norma.

La tabla 6 muestra los promedios temporales de los términos de la ecuación de energía integrados en todo el golfo para todas las simulaciones. La variación del C_d no afectó la distribución espacial de los términos pero sí los promedios. Por ejemplo, para el caso M2 (C_{d3}) se obtuvo un valor de $\langle D_f \rangle = -4.62$ GW, mientras que con el C_{d1} , con el cual se obtuvo el mejor ajuste para este caso, la disipación aumentó 27% ($\langle D_f \rangle = -5.87$ GW). Este incremento podría haberse esperado debido a que el C_{d1} es mayor que el C_{d3} ; sin embargo, la cantidad de energía que se disipa no es función lineal del C_d y estas estimaciones no eran conocidas. De igual forma, la disipación de energía en el golfo aumenta si se incrementa el número de componentes en una simulación. Por ejemplo, el valor de $\langle D_f \rangle$ para el caso “Todos” (C_{d3}) es 83% mayor que el valor de $\langle D_f \rangle$ del caso M2 (C_{d3}). Para un mismo caso, los promedios de $\langle E_c \rangle$, $\langle E_p \rangle$ y $\langle D_v \rangle$ fueron consistentes al cambiar el C_d . Para todas las simulaciones los errores fueron mínimos.

En este trabajo se simuló a la S_2 sola con el C_{d2} y se obtuvo un valor de $\langle D_f \rangle = -0.91$ GW (supongamos que es el caso S2). Con el C_{d2} por ejemplo, si sumamos linealmente la disipación de los casos M2 y S2 tenemos que $|\langle D_f \rangle_{M2} + \langle D_f \rangle_{S2}| < |\langle D_f \rangle_{MS}|$. Lo anterior muestra que las interacciones no lineales entre diferentes componentes de marea incrementan la energía que entra al golfo y, por lo tanto, la disipación. Marinone (1997) y Carbajal y Backhaus (1998) han reportado resultados similares.

where

is a norm.

Table 6 shows the temporal averages of the terms of the energy equation integrated in the entire gulf for all the simulations. The variation of C_d does not affect the spatial distribution of the terms but it does affect the averages. For example, a value of $\langle D_f \rangle = -4.62$ GW was obtained for the M2 case (C_{d3}), whereas with C_{d1} , with which the best fit for this case was obtained, dissipation increased 27% ($\langle D_f \rangle = -5.87$ GW). This increase was expected because C_{d1} is greater than C_{d3} ; however, the amount of energy dissipated is not a linear function of C_d and these estimates were not known. Likewise, the dissipation of energy in the gulf increases if the number of constituents in a simulation is increased. For example, the value of $\langle D_f \rangle$ for the “Todos” case (C_{d3}) is 83% higher than the value of $\langle D_f \rangle$ for the M2 case (C_{d3}). For the same case, the averages of $\langle E_c \rangle$, $\langle E_p \rangle$ and $\langle D_v \rangle$ were consistent as C_d was changed. The errors were minimum for all the simulations.

In this work, S_2 alone was simulated with C_{d2} and a value of $\langle D_f \rangle = -0.91$ GW was obtained (let us assume that it is case S2). With C_{d2} for example, if we linearly add the dissipation of the M2 and S2 cases we obtain $|\langle D_f \rangle_{M2} + \langle D_f \rangle_{S2}| < |\langle D_f \rangle_{MS}|$. This shows that the nonlinear interactions between different tidal constituents increase the energy that enters the gulf and, therefore, dissipation. Marinone (1997) and Carbajal and Backhaus (1998) have reported similar findings.

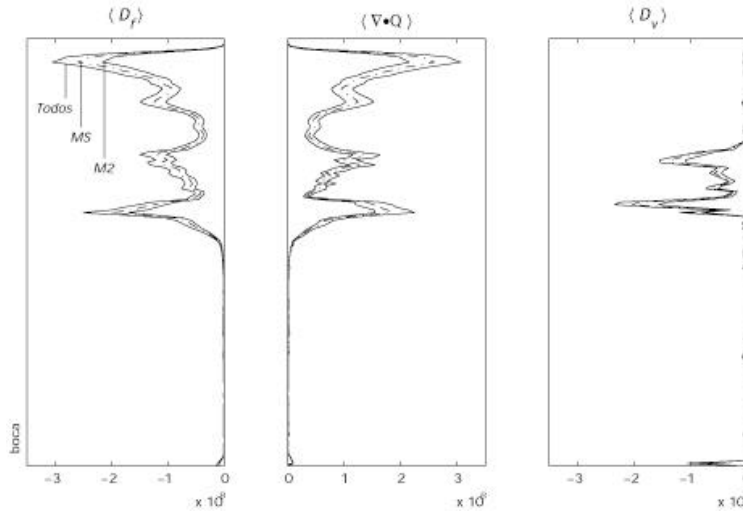


Figura 10. Integración lateral de los promedios temporales de los campos residuales de la disipación de energía por fricción de fondo, del flujo de energía y de la disipación viscosa para todos los casos. Las unidades están en watts.

Figure 10. Lateral integration of the temporal averages of the residual fields of the energy dissipation due to bottom friction, of the energy flow and of the viscous dissipation for all cases. The units are in watts.

Tabla 6. Promedios temporales de los campos residuales de la ecuación de energía para todas las simulaciones. Los promedios están integrados en todo el golfo. E_c es la energía cinética y E_p la potencial. Las unidades de E_c y E_p están en 10^{14} joules y las de D_f , $\nabla \cdot Q$ y D_v en 10^9 watts.

Table 6. Temporal averages of the residual fields of the energy equation for all simulations. The averages are integrated in all the gulf. E_c is the kinetic energy and E_p is the potential energy. The units of E_c and E_p are in 10^{14} joules and those of D_f , $\nabla \cdot Q$ and D_v in 10^9 watts.

Caso	C_d	$\langle E_c \rangle$	$\langle E_p \rangle$	$\langle D_f \rangle$	F	$\langle D_v \rangle$	ϵ_E
M2	C_{d1}	2.47	2.04	-5.87	5.97	-0.18	-0.01
M2	C_{d2}	2.52	2.07	-4.72	4.80	-0.18	-0.01
M2	C_{d3}	2.52	2.07	-4.62	4.71	-0.18	-0.01
MS	C_{d1}	2.97	2.48	-8.59	8.73	-0.21	0.00
MS	C_{d2}	3.04	2.52	-7.03	7.17	-0.23	-0.01
MS	C_{d3}	3.04	2.52	-6.90	7.04	-0.23	-0.01
“Todos”	C_{d1}	3.44	3.34	-10.43	10.55	-0.25	-0.01
“Todos”	C_{d2}	3.53	3.38	-8.60	8.73	-0.26	-0.01
“Todos”	C_{d3}	3.54	3.39	-8.45	8.58	-0.26	-0.01

CONCLUSIONES

La marea en el Golfo de California se reprodujo satisfactoriamente para todos los casos que se trataron en este trabajo. Para la M_2 y la S_2 el ajuste fue similar entre los casos. En este trabajo se demostró que la variación del coeficiente de fricción produce errores importantes en el ajuste de la marea. Modelar la marea en el golfo sólo con la M_2 es suficiente; incluir más componentes depende del interés de la investigación.

Las fuerzas más importantes de todo el balance de momento (residual y de marea) son el gradiente de presión, Coriolis y la fricción. En el balance residual, las fuerzas más grandes se encuentran en la región norte en la dirección longitudinal y son el gradiente de presión, la fricción y la advección. En el archipiélago, la fuerza más importante en la dirección transversal es la advección, mientras que en la dirección longitudinal es la fricción. En el sur del golfo en ambas direcciones las fuerzas dominantes están en balance geostrofico principalmente. En el balance de marea en la dirección transversal el balance principalmente es geostrofico en todo el golfo, mientras que en la dirección longitudinal el gradiente de presión es la fuerza más importante, el cual es balanceado en parte por la fricción y en parte por el cambio de v en el tiempo ($\partial v/\partial t$).

Una forma sencilla de explicar porqué el gradiente de presión, Coriolis y la fricción son los términos más importantes de todo el balance de momento es la siguiente: como el forzamiento en la boca del golfo se hizo a través del gradiente de presión, este término siempre fue parte del balance principal y, por lo tanto, es la fuerza motora de la marea en el golfo. Las condiciones de resonancia que se dan en el golfo y la disminución de la profundidad que existe hacia la cabeza,

CONCLUSIONS

The tide in the Gulf of California was satisfactorily reproduced for all cases studied in this work. For the M_2 and the S_2 , the fit was similar among the cases. It was shown that the variation of the friction coefficient produces important errors in the fit of the tide. Modeling the tide in the gulf with only M_2 is sufficient; the inclusion of more constituents depends on the scope of the study.

The most important forces in the momentum balance (residual and tidal) are the pressure gradient, Coriolis and friction. In the residual balance, the largest forces are the pressure gradient, friction and advection, and they occur in the northern region in the longitudinal direction. In the archipelago, the most important force in the transverse direction is advection, and in the longitudinal direction, friction. In both directions in the southern gulf, the dominant forces are mainly in the geostrophic balance. In the tidal balance in the transversal direction, the principal balance is geostrophic in all the gulf, whereas in the longitudinal direction, the pressure gradient is the most important force, which is balanced in part by friction and in part by the change of v in time ($\partial v/\partial t$).

A simple way to explain why the pressure gradient, Coriolis and friction are the most important terms in the momentum balance is the following: as the forcing in the mouth of the gulf was made with the pressure gradient, this term was always part of the principal balance and, therefore, is the driving force of the tide in the gulf. The conditions of resonance that occur in the gulf and the decrease in depth that exists at the head, cause the amplitudes of the tide to increase considerably in the northern region. As a result, there is a large tide interval in this region that translates into a large amount of potential energy. This energy converts into

provocan que las amplitudes de la marea se incrementen considerablemente en la región norte. Como consecuencia, existe un gran intervalo de marea en esta región, que se traduce en una gran cantidad de energía potencial; esta energía se convierte a energía cinética y parte de ella se disipa debido a la fricción con el fondo. Como el movimiento de la marea en el golfo se da principalmente en la dirección longitudinal, la fricción es importante en esta dirección. En la dirección u la fricción no es tan importante como en v y Coriolis (f_v) adquiere importancia, principalmente en el sur del golfo. Por estas razones los términos que están en balance con el gradiente de presión son Coriolis y la fricción, en u y v , respectivamente.

Las regiones en donde se disipa la mayor parte de la energía de la marea son la región norte y el archipiélago, principalmente en el Alto Golfo, en Bahía Adair, en el Canal de Ballenas y en los umbrales de San Lorenzo y San Esteban. Aproximadamente 54% de la energía total se disipa en la región norte mientras que 41% se disipa en el archipiélago. La pérdida de energía por viscosidad es mucho menor que la pérdida de energía por fricción de fondo.

Introducir más componentes de marea en una simulación no altera significativamente la distribución espacial de los balances de momento y energía, pero sí aumenta la cantidad de energía que entra al golfo y, por lo tanto, la transferencia de momento y energía a frecuencias bajas (e.g., mareas de largos periodos como la M_f o la M_m).

Finalmente, en el modelado de la marea fue importante realizar un buen ajuste a través del coeficiente de fricción. Su variación no afectó la dinámica de la marea, pero sí la cantidad de energía que se disipa en promedio dentro del golfo.

kinetic energy and part of it dissipates due to bottom friction. Since the movement of the tide in the gulf is mainly longitudinal, friction is important in this direction. In direction u , friction is not as important as in v and Coriolis (f_v) gains importance, mainly in the southern gulf. For these reasons, the terms that are in balance with the pressure gradient are Coriolis and friction in u and v , respectively.

The regions where most of the tidal energy is dissipated are the northern region and archipelago, mainly in the Upper Gulf, Adair Bay, Ballenas Channel and the San Lorenzo and San Esteban sills. Approximately 54% of the total energy dissipates in the northern region, whereas 41% dissipates in the archipelago. The loss of energy from viscosity is much lower than the loss of energy from bottom friction.

Introducing more tidal constituents in a simulation does not significantly alter the spatial distribution of the balances of momentum and energy, but it does increase the amount of energy that enters the gulf and, therefore, the transfer of momentum and energy to low frequencies (e.g., long-period tides, such as M_f or M_m).

In the modeling of the tide, it was important to obtain a good fit with the friction coefficient. Its variation did not affect the dynamics of the tide, but it did affect the amount of energy that dissipates, on average, within the gulf.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed by the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) and by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) (G. García through a scholarship and S. Marinone through project 4300P-T).

English translation by Jennifer Davis.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue apoyado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) (G. García a través de una beca crédito y S. Marinone con el proyecto 4300P-T).

REFERENCIAS

- Argote, M.L., Amador, A., Lavín, M.F. and Hunter, J.R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 100: 16103–16118.
- Badan-Dangon, A., Hendershott, M.C. and Lavín, M.F. (1991). Underway Doppler current profiles in the Gulf of California. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 72: 209, 217–218.
- Beier, E. (1999). Estudio de la marea y la circulación estacional en el Golfo de California mediante un modelo de dos capas heterogéneas. Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 136 pp.
- Carbajal, N. and Backhaus, J. (1998). Simulation of tides, residual flow and energy budget in the Gulf of California. *Oceanol. Acta*, 21: 429–446.
- Crean, P. (1978). A numerical model of barotropic mixed tides between Vancouver Island and the Mainland and its relation to studies of the estuarine circulation. In: J. Nihoul (ed.), *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*. Elsevier, New York, pp. 283–314.
- Crean, P., Murty, T. and Stronach, J. (1988). Mathematical modeling of tides and estuarine circulation. In: *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. Springer-Verlag, 30: XV, 471 pp.
- Filloux, J.H. (1973). Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Nature*, 243: 217–221.
- García-Silva, G. (1999). Caracterización dinámica y energética de la marea en el Golfo de California. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 55 pp.
- Marinone, S.G. (1997). Tidal residual currents in the Gulf of California: Is the M_2 tidal constituent sufficient to induce them? *J. Geophys. Res.*, 102: 8611–8623.
- Morales, R. y Gutiérrez, G. (1989). Mareas en el Golfo de California. *Geofís. Int.*, 28: 25–46.
- Ripa, P. y Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California. *Geofís. Int.*, 32: 41–56.
- Stock, G.G. (1976). Modeling tides and tidal dissipation in the Gulf of California. Ph.D. thesis, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, 133 pp.
- Zavala, J. (1993). Parametrización de la fricción lineal de fondo para el Golfo de California mediante la comparación de dos modelos de marea. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México, 40 pp.
- Zavala, J. (1996). Estudios sobre la propagación de modos en un canal con aplicación a la marea en el Golfo de California. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, 68 pp.