

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



**MODELACIÓN DE CORRIENTES RESIDUALES EN EL
GOLFO DE CALIFORNIA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN
DE DIFERENTES TAMAÑOS DE MALLA**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

OCEANÓLOGO

**PRESENTA:
GERARDO MANUEL GARCÍA SILVA**

ENSENADA, B.C., SEPTIEMBRE DE 1996.

RESUMEN

En este trabajo se estudió el efecto de la resolución horizontal en la modelación de las corrientes residuales producidas por la marea (M_2) en el Golfo de California. Se utilizó un modelo numérico, bidimensional, verticalmente integrado, que resuelve explícitamente las ecuaciones de momentum y continuidad por el método de diferencias finitas. Los tamaños de malla usados (11 en total) van desde 14 x 14 hasta 2 x 2 km. Los resultados muestran que la modelación de la marea y de las corrientes residuales fue consistente con los diferentes tamaños de malla. En la parte norte del golfo se obtuvo un patrón de circulación residual bien definido, alineado a las isóbatas, mientras que en el archipiélago, la presencia de un giro anticiclónico bien formado fue evidente al noroeste de la isla Tiburón. En el resto del golfo, no se encontró un patrón de circulación residual apreciable. Las velocidades máximas de las corrientes residuales para todas las batimetrías se obtuvieron en el archipiélago, con velocidades de hasta 18 cm s^{-1} ; en cambio, las magnitudes de la velocidad en la parte norte del golfo fueron, para todas las mallas, del orden de 1 cm s^{-1} . Finalmente, la malla de 3 x 3 km es suficiente para obtener una buena resolución del campo de velocidad residual en la parte norte del golfo.

MODELACIÓN DE CORRIENTES RESIDUALES EN EL
GOLFO DE CALIFORNIA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN
DE DIFERENTES TAMAÑOS DE MALLA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
O C E A N Ó L O G O

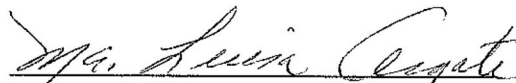
PRESENTA:
GERARDO MANUEL GARCÍA SILVA

Aprobada por:



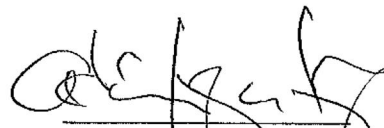
Dr. Silvio Guido Marinone Moschetto

Presidente del Jurado



Dra. María Luisa Argote Espinoza

Sinodal Propietario



Dr. Adán Mejía Trejo

Sinodal Propietario

Dedicatoria

A mis padres Nicolás García Garza y Marisela Silva de García, por su incondicional apoyo que siempre me han dado y por su admirable ejemplo que nunca olvidare. Los quiere Gerardo.

A mis hermanos Octavio y Eduardo, y a Marcela, por lo que hemos compartido y compartiremos juntos el resto de nuestras vidas.

A katia, por todos los grandes momentos que hemos vivido juntos y por la gran amistad y cariño que nos une y que durará toda la vida. Jeg elsker dig.

Agradecimientos

Al Dr. Silvio Guido Marinone Moschetto, por su paciencia y tiempo que me dedicó para este trabajo, por sus consejos y enseñanzas, que me motivaron aún más en el área de la investigación, y en especial, por haberme brindado su amistad. Gracias Guido.

A mis sinodales Dra. María Luisa Argote Espinoza y Dr. Adán Mejía Trejo, por sus comentarios tan valiosos para el enriquecimiento de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Baja California y a la Facultad de Ciencias Marinas, por haberme dado las bases para ejercer mi profesión.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Un sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me ayudaron con sus comentarios en la elaboración de esta tesis.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	iii
Agradecimientos	iv
1. Introducción	1
1.1 Batimetría	1
1.2 Mareas	3
1.3 Corrientes residuales	6
1.3.1 Antecedentes	7
1.4 Objetivo	9
2. Metodología	10
2.1 Discretización de la batimetría	10
2.2 El modelo	12
2.3 Simulación numérica	18
3. Resultados	19
3.1 Las mareas	19
3.2 La circulación residual	29
3.3 Disipación de energía	38
4. Discusiones	41
4.1 Circulación residual	41
5. Conclusiones	44
6. Recomendaciones	45
7. Literatura citada	46

Lista de Tablas

1	Dimensiones de las diferentes mallas utilizadas en el modelo. Se muestran el número de renglones (nr), número de columnas (nc), área del golfo (A) y profundidad máxima (H_{max}) de cada malla. Se incluye el paso de tiempo máximo permisible (Δt_{mp}) [Courant et al., 1928] y utilizado (Δt_u) con cada malla.	11
2	Amplitudes (cm) modeladas, para los distintos tamaños de malla, y observadas (A_{obs}) en diferentes estaciones alrededor del golfo (ver Figura 2a para su ubicación).	23
3	Fases (grados con respecto a Greenwich) modeladas, para los distintos tamaños de malla, y observadas (ϕ_{obs}) en diferentes estaciones alrededor del Golfo de California (ver Figura 2a para su ubicación).	24
4	Promedio de las diferencias que existen en amplitud (cm) y fase (grados con respecto a Greenwich) entre los valores modelados (A_{Mod} y ϕ_{Mod}) y observados (A_{obs} y ϕ_{Obs}) para cada tamaño de malla. La letra n denota el número total de estaciones (mostradas en las Tablas 2 y 3), mientras que i representa a cada una de ellas. La desviación estándar indica la consistencia de los resultados.	25
5	Comparación entre la malla de 6.47618 km elaborada para este trabajo y la utilizada por Argote et al. [1996] y Marinone [1996]. Se muestran el número de renglones (nr), número de columnas (nc), área de la malla (A_{malla}), área del golfo (A_{golfo}) y profundidad máxima (H_{max}) de cada malla.	27
6	Simulaciones llevadas a cabo con la malla de 6.47618 km de este trabajo (2-5) y con la de Argote et al. [1996] y Marinone	

	[1996] (1). Se muestran las amplitudes (cm) observadas (A_{obs}) y las reportadas por <i>Argote et al.</i> [1996] (A_{argote}) y <i>Marinone</i> [1996] ($A_{Marinone}$) en algunas estaciones del golfo.	28
7	Disipación de energía de la marea (M_2) en el Golfo de California y por unidad de área. El tamaño de malla subrayado indica la simulación llevada a cabo con la batimetría de <i>Argote et al.</i> [1996] y <i>Marinone</i> [1996].	40

Lista de Figuras

1	Localización del Golfo de California.	2
2a	Batimetría (m) del Golfo de California. Se muestra la localización de diferentes estaciones mareográficas alrededor del golfo.	4
2b	Batimetría (m) del archipiélago y de la parte norte del Golfo de California.	5
3a	Batimetría (m) de las mallas de 14 y 2 km. Se muestra el archipiélago y la parte norte del golfo. El intervalo de los contornos es de 200 m.	13
3b	Batimetría (m) de las mallas de 14 y 2 km. Se muestra el centro y sur del golfo. El intervalo de los contornos es de 200 m.	14
4	Batimetría del Golfo de California para la malla de 8 km. La escala de colores (m) muestra la variación de la profundidad en la malla.	15
5	Notación de la malla bidimensional. Los puntos η son los lugares donde las elevaciones son calculadas y las profundidades especificadas. Las componentes de transporte son calculadas en los puntos U y V , respectivamente.	17
6	Mapa cotidal de la marea modelada para el tamaño de malla de 12 km. Las amplitudes están en centímetros y las fases en grados con respecto a Greenwich. Se muestra la ubicación de San Felipe (1) y Puerto Peñasco (2).	20
7	Mapa cotidal de la marea modelada para el tamaño de malla de 6 km. Las amplitudes están en centímetros y las fases en grados con respecto a Greenwich. Se muestra la ubicación de San Felipe (1) y Puerto Peñasco (2).	21
8	Mapa cotidal de la marea modelada para el tamaño de malla de	

	2 km. Las amplitudes están en centímetros y las fases en grados con respecto a Greenwich. Se muestra la ubicación de San Felipe (1) y Puerto Peñasco (2).	22
9	Batimetría (m) del archipiélago de a) malla utilizada por <i>Argote et al.</i> [1996] y <i>Marinone</i> [1996], y b) malla de 6.47618 km elaborada en este trabajo. El intervalo de los contornos es de 200 m. Los contornos de las dos batimetrías son muy parecidos, pero se observan algunas diferencias entre ellos (<i>e.g.</i> en la batimetría de este trabajo, la profundidad de la cuenca de Tiburón es de 300 m, y el tamaño de la isla San Esteban es el doble que el de la figura 9a; mientras tanto, en la figura 9a no aparece la isla San San Lorenzo).	30
10	Velocidades (cm s^{-1}) de marea para la región norte del golfo para la malla de 12 km. El número de la esquina superior derecha indica el tiempo (en horas) en el que fue hecha la lectura.	31
11	Velocidades (cm s^{-1}) de marea para la región norte del golfo para la malla de 8 km. El número de la esquina superior derecha indica el tiempo (en horas) en el que fue hecha la lectura.	32
12	Velocidades (cm s^{-1}) de marea para la región norte del golfo para la malla de 6 km. El número de la esquina superior derecha el tiempo (en horas) en el que fue hecha la lectura.	33
13	Circulación residual (cm s^{-1}) en la parte norte del golfo. Los números en la esquina superior derecha de cada figura son la raíz cuadrática media de la velocidad para el área mostrada.	35
13	Continuación. La simulación de la Figura 13g fue llevada a cabo con la batimetría de <i>Argote et al.</i> [1996] y <i>Marinone</i> [1996] (el patrón de circulación residual mostrado en esta figura es el mismo que el reportado por <i>Marinone</i> [1996] para la M_2).	36

13	Continuación.....	37
14	Circulación residual (cm s^{-1}) en el archipiélago del Golfo de California para la malla de 5 km.	39

1. Introducción

Las mareas en el Golfo de California son de gran interés científico debido a su importancia en la dinámica del golfo. Las corrientes de marea son fuertes, principalmente en los umbrales (1.5 m s^{-1}) [Badan-Dangon *et al.*, 1991] y fuera de la boca del río Colorado (3 m s^{-1}) [Roden y Groves, 1959]. Durante el flujo y reflujó, las corrientes de marea interactúan con la batimetría del golfo y producen flujos con velocidades de uno o dos órdenes de magnitud menor que las corrientes de marea [Robinson, 1983]; estos flujos son conocidos como corrientes residuales.

En años recientes la circulación residual del Golfo de California ha sido estudiada a través de modelos numéricos [*e.g.* Durazo, 1989; Quirós *et al.*, 1992; Carbajal, 1993; Argote *et al.*, 1996; Marinone, 1996]. Una limitación en estos estudios ha sido el tamaño de malla utilizado, y el papel que juega el efecto de su resolución en la modelación, aún no está claro. Este es el tema de interés en este trabajo.

A continuación se hará una breve descripción de la batimetría del golfo y de los principales rasgos de la marea y corrientes residuales de marea que ocurren en él.

1.1 Batimetría

El Golfo de California es un mar marginal ubicado al noroeste de la República Mexicana (Figura 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 1 100 km de largo.

La presencia de un archipiélago, formado principalmente por las islas Tiburón y Ángel de la Guarda, reduce el ancho del golfo considerablemente, y

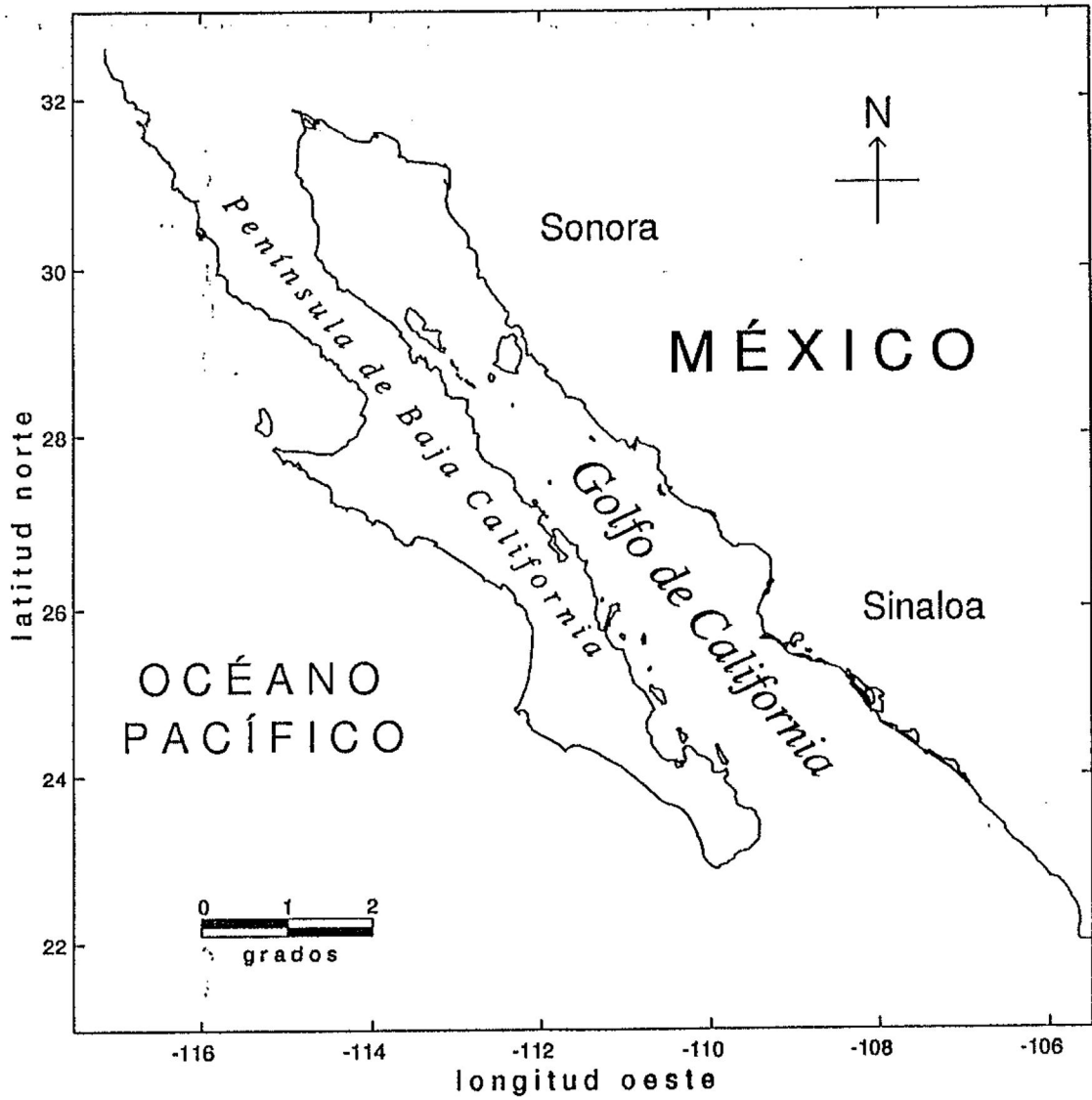


Figura 1. Localización del Golfo de California.

la compleja batimetría de esta zona lo divide en dos regiones oceanográficas: una somera al norte y otra profunda al sur (ver Figura 2a).

La región norte del golfo (Figura 2b) es considerada como parte de la plataforma continental y presenta dos cuencas relativamente profundas: la del Delfín con 800 m y la de Wagner con 200 m. El resto de esta región presenta en general una topografía simple, con una zona plana y muy somera al sur de la boca del río Colorado. El término Alto Golfo se refiere a la zona comprendida entre San Felipe, Puerto Peñasco y el río Colorado [Argote *et al.*, 1996].

El archipiélago o zona de las islas (Figura 2b) se distingue por presentar importantes cambios en la profundidad. Entre la isla Ángel de la Guarda y la península de Baja California se encuentra el canal de Ballenas y la cuenca de Salsipuedes. El canal es estrecho (~ 15 km) y largo (~ 125 km), y en la cuenca se encuentran profundidades de hasta 1 600 m. Entre las islas Ángel de la Guarda y Tiburón se encuentra la cuenca Tiburón con profundidades de 400 m. En medio de la isla Tiburón y Sonora se encuentra el canal El Infiernillo, el cual es plano, estrecho y poco profundo.

Las cuencas de Guaymas, del Carmen, de Farallón, y de Pescadero caracterizan el sur del golfo (Figura 2a). Las profundidades se incrementan de 2 000 m en la cuenca de Guaymas a 3 600 m en la boca del Golfo de California.

1.2 Mareas

El comportamiento de la marea en el Golfo de California ha sido ampliamente estudiado a través de observaciones [*e.g.* Filloux, 1973; Morales y Gutiérrez, 1989] e investigaciones numéricas [*e.g.* Grijalva, 1972; Stock, 1976; Dressler, 1981; De León y Ripa, 1987; Quirós *et al.*, 1992; Carbajal, 1993; Ripa y Velázquez, 1993; Argote *et al.*, 1995]. En el Golfo de California, la principal componente de marea es la M_2 [Filloux, 1973; Dressler, 1981], y su

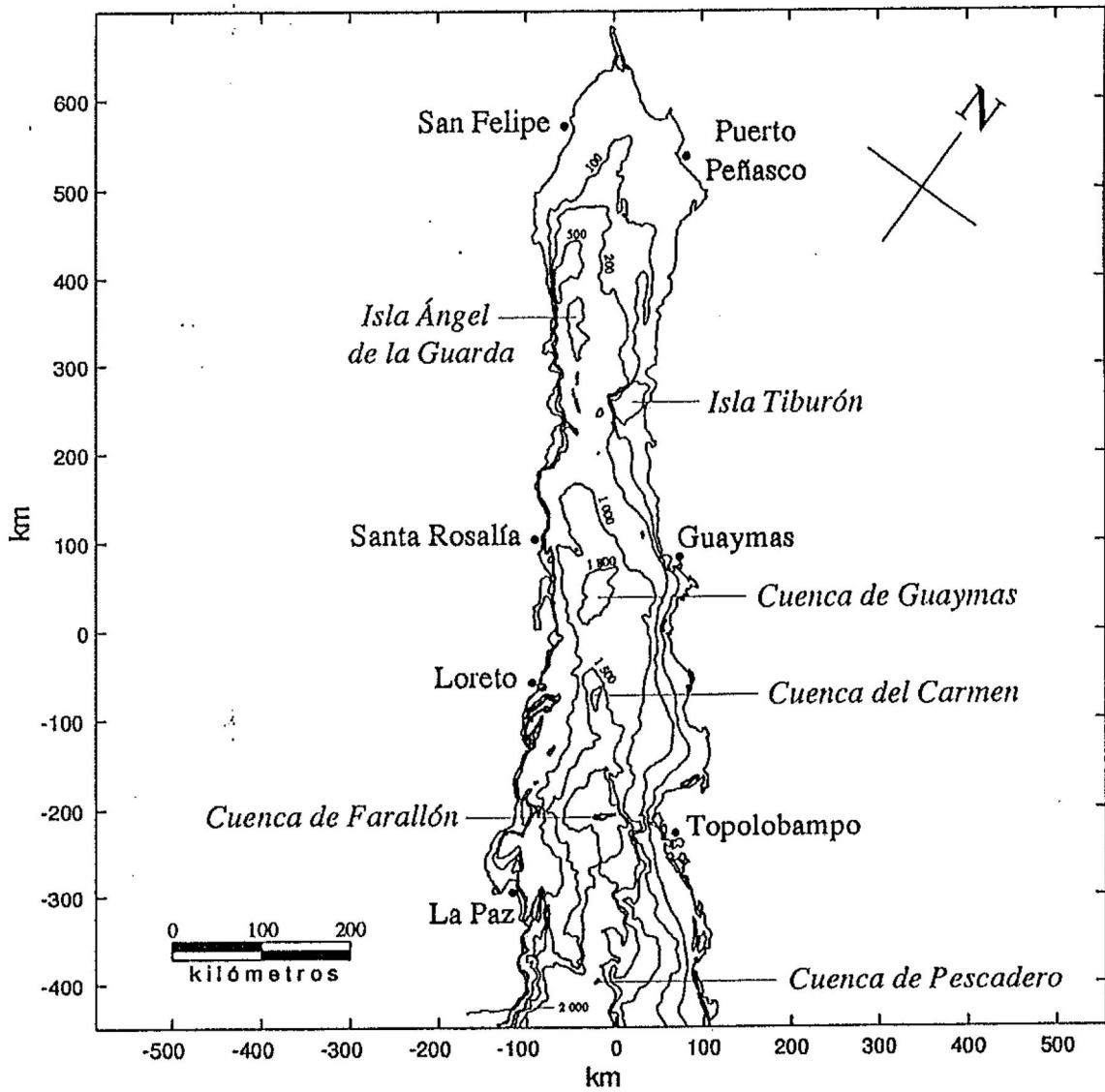


Figura 2a. Batimetría (m) del Golfo de California. Se muestra la localización de diferentes estaciones mareográficas alrededor del golfo.

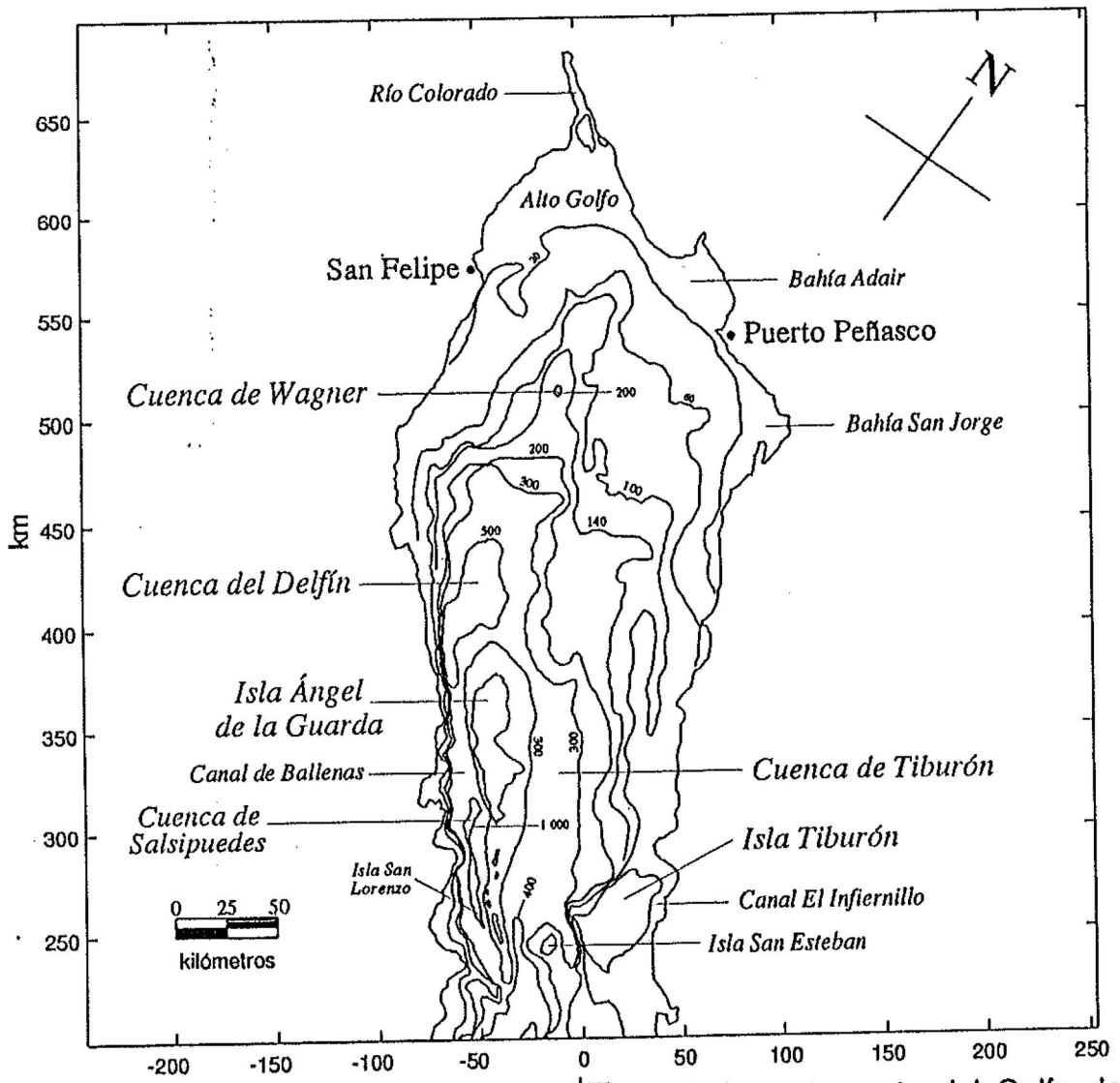


Figura 2b. Batimetría (m) del archipiélago y de la parte norte del Golfo de California.

propagación dentro del golfo es del tipo de una onda de Kelvin, como es descrito por *Hendershott y Speranza* [1971]. Básicamente, la marea (M_2) en el Golfo de California se produce como una co-oscilación con la marea del Océano Pacífico [*Hendershott y Speranza*, 1971].

En el Golfo de California, el comportamiento de las mareas semidiurnas y diurnas es muy diferente. Por ejemplo, la M_2 entra al golfo con una amplitud ligeramente superior a los 30 cm. Cerca de Santa Rosalía (ver Figura 2a para su ubicación) su amplitud decrece casi dos terceras partes de su valor original, mientras que en el norte del golfo se incrementa considerablemente (~ 1.8 m). Este comportamiento es similar para los otros constituyentes semidiurnos. En contraste, las amplitudes de las mareas diurnas se incrementan uniformemente hacia la cabeza, pero menos de dos veces el valor de su amplitud en la boca.

Las condiciones de resonancia que existen en el golfo y el asomeramiento del fondo presente hacia la cabeza son los causantes de la gran amplificación de las amplitudes de marea (principalmente de las semidiurnas) en la parte norte del golfo [*Hendershoot y Speranza*, 1971; *Filloux*, 1973; *Godin*, 1993].

El Golfo de California absorbe más del 70 % de la energía proveniente de la M_2 y la mayor parte de ésta se disipa en la parte norte del golfo (debido a la fricción con el fondo). La gran disipación de energía que existe en esta región da como resultado la presencia de un punto amfidrómico virtual ubicado dentro de la península (cerca de Santa Rosalía) [*Hendershoot y Speranza*, 1971; *Filloux*, 1973].

1.3 Corrientes residuales

Los trabajos realizados por *Tee* [1976, 1977], *Zimmerman* [1978, 1980], *Robinson* [1983] y *Pingree y Maddock* [1985] muestran que la interacción de la

marea con la topografía produce una circulación residual. Existen muchas definiciones de corrientes residuales, pero en el presente trabajo se definen como la parte del flujo que queda después de que todas las corrientes de marea han sido removidas. El término residual se refiere al promedio de las velocidades de marea en un ciclo completo de marea.

1.3.1 Antecedentes

Los estudios sobre la circulación residual en el Golfo de California se caracterizan por el uso de modelos bidimensionales (no lineales) (*Carbajal* [1993] utilizó también un modelo tridimensional), y en su mayoría, el forzamiento de la marea ha sido únicamente con la M_2 . A continuación se resumen los resultados (correspondientes a la M_2) de estos trabajos.

Durazo [1989] reportó una circulación residual producida por la M_2 hacia la cabeza del golfo, a lo largo de las costas de Baja California y Sonora, con corrientes del orden de 1 cm s^{-1} . Encontró que este flujo costero da lugar a varios giros de pequeña escala (10 - 15 km) en la región somera del norte. Señaló también la presencia de dos giros (uno ciclónico y otro anticiclónico) en la zona profunda. El tamaño de malla usado en este trabajo fue de $3.3 \times 3.3 \text{ km}$, y el forzamiento de la marea, fue justo al norte del archipiélago.

Quirós et al. [1992] modelaron las corrientes de marea producidas por la M_2 . Reportaron una circulación residual apreciable al sureste de la Isla Ángel de la Guarda y en la parte norte del golfo. Encontraron que los flujos máximos ocurren en la región norte debido a la reducida profundidad presente en esa zona, y que forman un giro ciclónico bien desarrollado que abraza la costa de Sonora con velocidades cercanas a 5 cm s^{-1} fuera de Puerto Peñasco. Reportaron que en la parte sur del golfo no se apreciaron efectos residuales apreciables. Ellos utilizaron en su modelo un tamaño de malla de $14 \times 14 \text{ km}$.

Carbajal [1993] modeló la circulación del golfo con diferentes constituyentes de marea. Los resultados que obtuvo con sus modelos, correspondientes al forzamiento con la M_2 , son opuestos en la región norte del golfo: con su modelo bidimensional reportó una circulación residual anticiclónica, con velocidades de hasta 2 cm s^{-1} ; en cambio, con su modelo tridimensional obtuvo una circulación hacia el oeste (capa superficial), con velocidades de 2 a 5 cm s^{-1} . Para ambos modelos mencionó que la circulación residual al sur del golfo fue menor que en el norte. Los tamaños de malla que utilizó en sus modelos fueron $6' \times 6'$ y $3' \times 3'$, respectivamente ($6'$ equivalen a 10.243 km en la boca del golfo y a 9.450 km en la parte norte).

Argote et al. [1996] modelaron la circulación del golfo producida por la M_2 y por el esfuerzo del viento. En lo que corresponde a la circulación residual producida por la marea, encontraron una circulación anticiclónica en la región norte del golfo, con velocidades de 2.5 cm s^{-1} en la Cuenca del Delfín. También mencionaron que la fricción del fondo juega un papel importante en las zonas más someras al sur del río Colorado. Obtuvieron que en la zona del archipiélago ocurren las corrientes residuales más fuertes. El tamaño de malla que usaron fue de aproximadamente $6.5 \times 6.5 \text{ km}$.

Marinone [1996] modeló las corrientes residuales producidas por los principales constituyentes de marea diurnos y semidiurnos. En su trabajo concluye que el forzamiento con la M_2 es suficiente para modelar las corrientes residuales en el golfo. Sus resultados, para esta componente, son muy similares a los reportados por *Argote et al.* [1996]. La batimetría utilizada en este trabajo fue la misma que la de *Argote et al.* [1996].

Cabe señalar que la circulación residual reportada por *Durazo* [1989] es consistente con la de *Quirós et al.* [1992]; sin embargo, ésta es básicamente opuesta a la obtenida por *Carbajal* [1993] (modelo bidimensional), *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996]. Una causa de estas diferencias puede ser la

diferente discretización que existe entre las batimetrías empleadas, dado que el tamaño de malla usado en los modelos numéricos es importante en la representación espacial del campo de velocidad residual [Zimmerman, 1978].

1.4 Objetivo

- Estudiar el efecto de la resolución horizontal en la modelación de las corrientes residuales producidas por la marea (M_2) en el Golfo de California, mediante la utilización de diferentes tamaños de malla.

2. Metodología

2.1 Discretización de la batimetría

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se pretende conocer el efecto que tiene la resolución horizontal en la modelación de las corrientes residuales en el Golfo de California. Dado que el mayor tamaño de malla utilizado en este tipo de estudios es el de *Quirós et al.* [1992] (14 x 14 km) y que la excursión de marea en la parte norte del golfo es de aproximadamente 3 km [*Argote et al.*, 1996], los tamaños de malla escogidos para este trabajo van desde 14 x 14 hasta 2 x 2 km. En el resto de este trabajo 14 km se refiere a la malla de 14 x 14 km; 12 km, a la malla de 12 x 12 km, y así para las demás mallas.

El primer paso fue digitalizar la batimetría del Golfo de California. Se obtuvieron un total de 197 archivos que comprenden la batimetría, la línea de costa y el contorno de las islas del Golfo de California. Cada archivo contiene la posición geográfica (en longitud y latitud) de sólo una isóbata del golfo. Los archivos se encuentran disponibles en un banco de datos, y se puede obtener mayor información sobre ellos en *García et al.* [1996].

Posteriormente las isóbatas digitalizadas fueron convertidas de coordenadas geográficas a cartesianas. Para esto, el centro del golfo en coordenadas geográficas (111° O, 27° N) se tomó como el punto de referencia (0, 0) en coordenadas cartesianas, y la distancia en metros de cada punto digitalizado a este punto de referencia fue calculada. Finalmente estas isóbatas fueron rotadas 36° E (dado que el eje central del golfo esta orientado 324° con respecto al norte), para que las mallas a elaborar abarcaran la menor área de tierra posible.

En la elaboración de las mallas se utilizó el programa Surfer (Versión 5.0 para Windows). Ya realizadas las mallas (Tabla 1), se escogió arbitrariamente

Tabla 1. Dimensiones de las diferentes mallas utilizadas en el modelo. Se muestran el número de renglones (nr), número de columnas (nc), área del golfo (A) y profundidad máxima (H_{max}) de cada malla. Se incluye el paso de tiempo máximo permisible (Δt_{mp}) [Courant et al., 1928] y utilizado (Δt_u) con cada malla.

Tamaño de malla (km)	nr	nc	A km ²	H_{max} (m)	Δt_{mp} (s)	Δt_u (s)
14	78	20	162 680	3 508	53.39	22.356
12	90	23	160 560	3 213	47.82	22.356
10	107	28	162 400	3 364	38.94	22.356
8	134	34	160 000	3 508	30.51	22.356
7	154	38	159 740	3 508	26.70	22.356
6	178	44	160 452	3 542	22.77	22.356
5	214	53	160 100	3 622	18.77	18.000
4	268	66	159 872	3 636	14.98	12.000
3	356	87	159 768	3 622	11.26	9.000
2	533	129	159 232	3 636	7.49	6.000

una profundidad de 10 m en aquellas regiones del golfo donde la profundidad interpolada fue menor a ésta (e.g. al sur de la boca del río Colorado). La zona del río Colorado y la forma de embudo de su delta no se incluyeron en ninguna malla, debido a que se procuró que la discretización de todas ellas fuera lo más parecida posible. Por último, los contornos de las mallas fueron graficados y comparados entre sí para observar la calidad de las mismas (como ejemplo, ver Figuras 3a y 3b).

Un ejemplo de la discretización de la batimetría del golfo se muestra en la Figura 4 para la malla de 8 km.

2.2 EL MODELO

Para el presente trabajo se utilizó un modelo numérico bidimensional, verticalmente integrado, desarrollado por *Crean* [1978]. El modelo ha sido ampliamente usado y reproduce exitosamente las elevaciones, corrientes de marea y residuales de marea de muchos lugares (e.g. sistema estuarino del Estrecho de Georgia/Juan de Fuca [*Crean et al.*, 1988], parte central del Estrecho de Georgia [*Marinone y Fyfe*, 1992], Golfo de California [*Marinone*, 1996]). Una completa descripción del modelo se puede encontrar en *Crean et al.* [1988].

Las ecuaciones usadas en el modelo son:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{H} \right) - fV + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_x - \nu \nabla^2 U = 0,$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{H} \right) + fU + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_y - \nu \nabla^2 V = 0,$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v} H) = 0,$$

donde los esfuerzos del fondo son dados por una ley cuadrática, es decir,

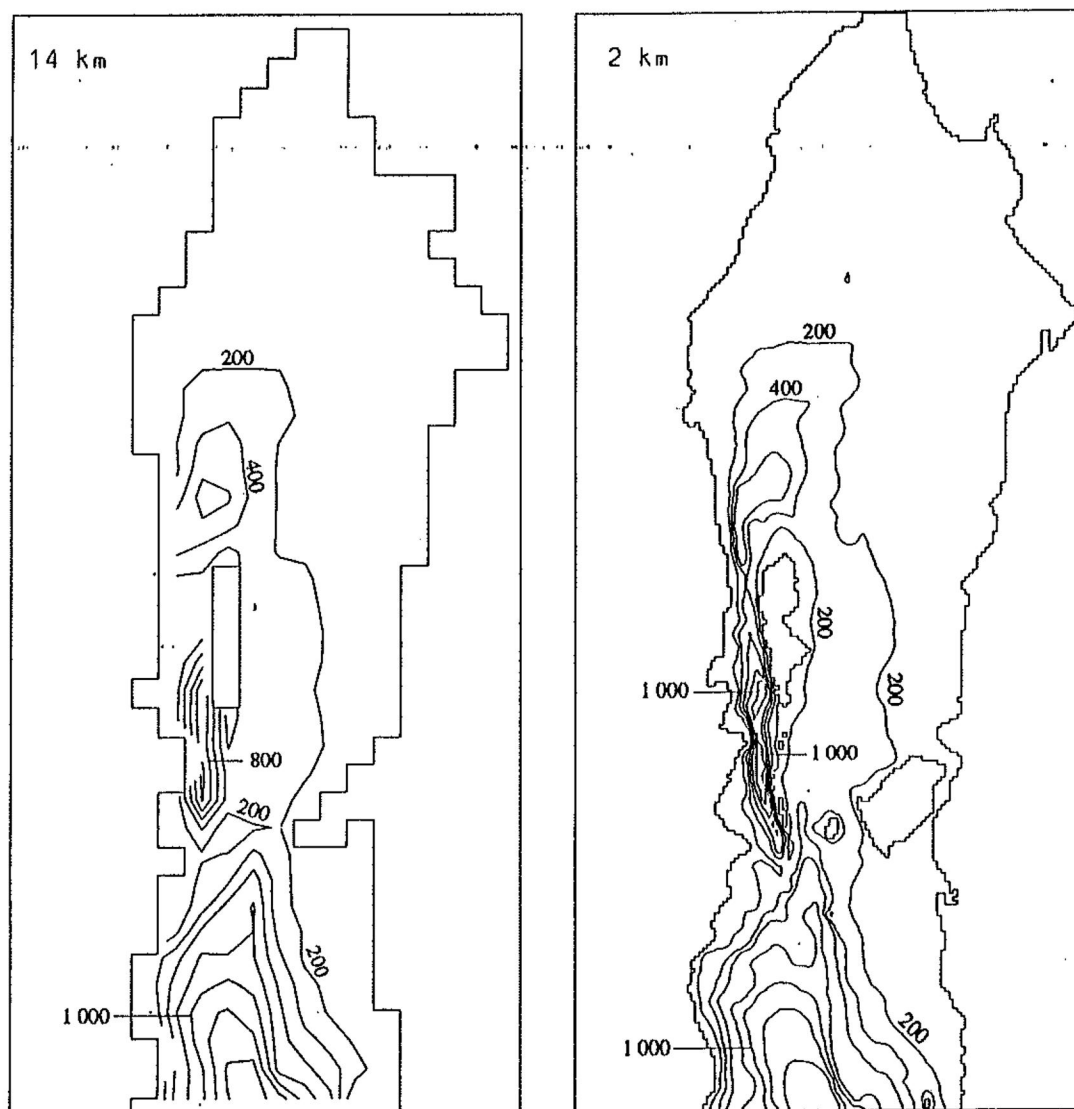


Figura 3a. Batimetría (m) de las mallas de 14 y 2 km. Se muestra el archipiélago y la parte norte del golfo. El intervalo de los contornos es de 200 m.

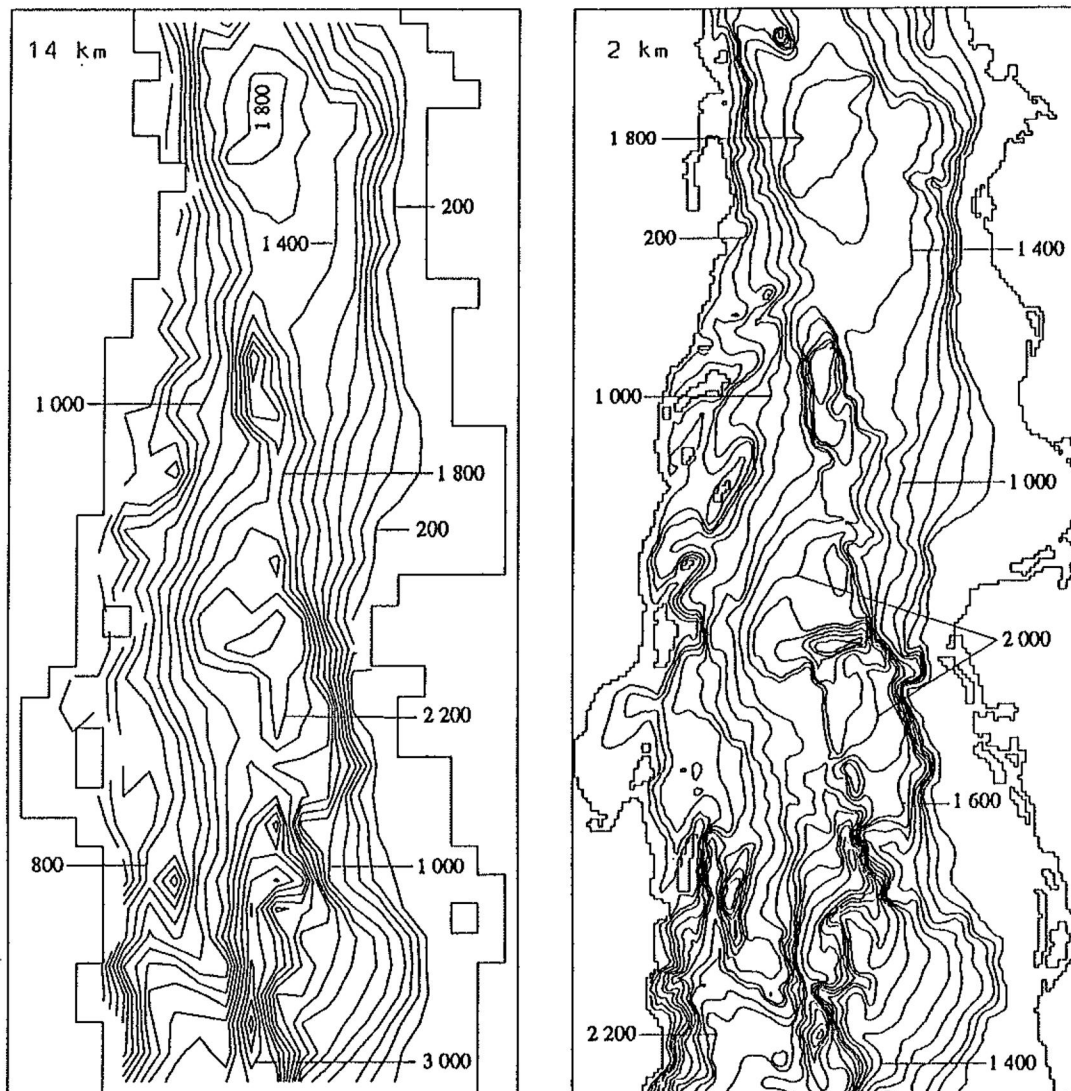


Figura 3b. Batimetría (m) de las mallas de 14 y 2 km. Se muestra el centro y sur del golfo. El intervalo de los contornos es de 200 m.

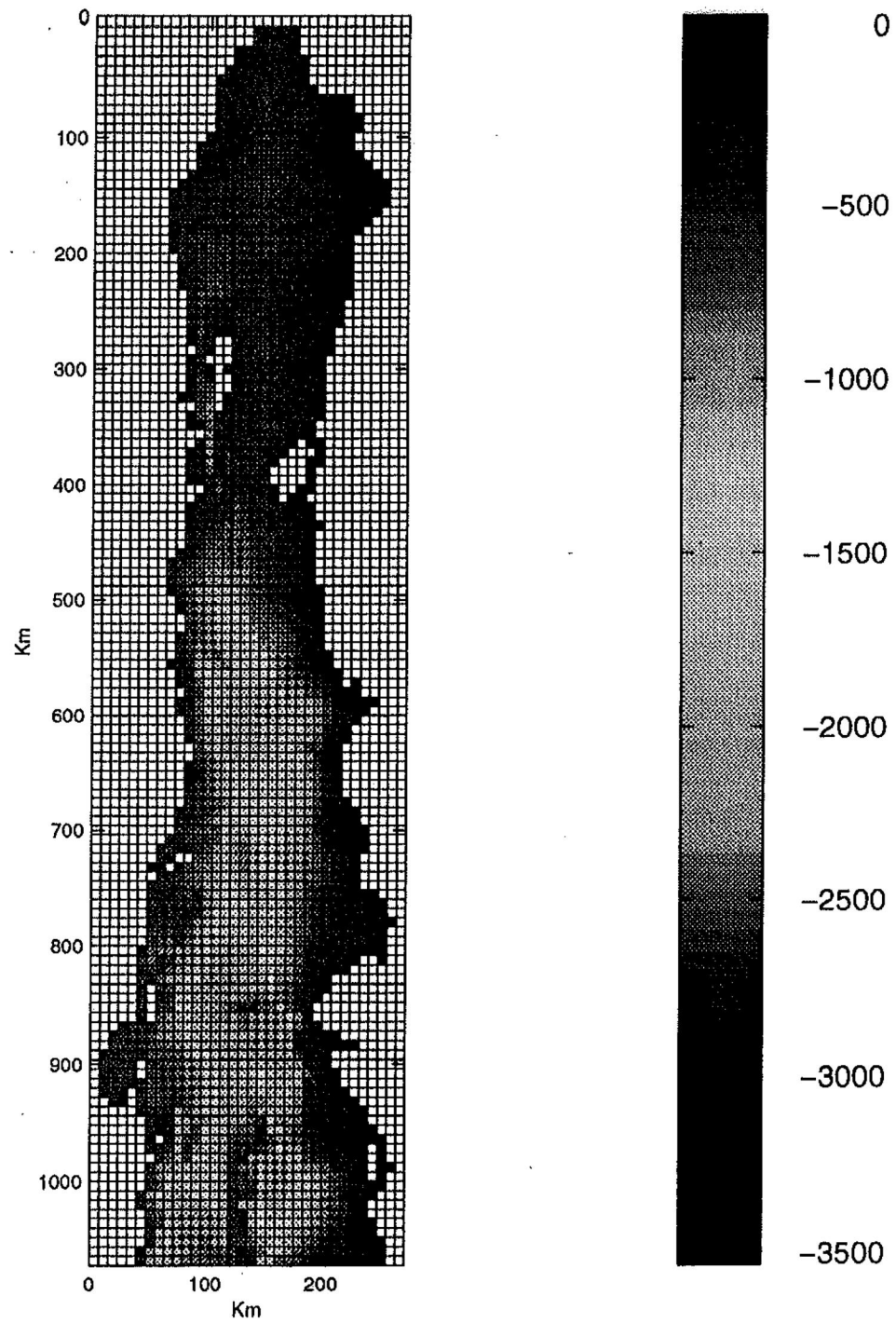


Figura 4. Batimetría del Golfo de California para la malla de 8 km. La escala de colores (m) muestra la variación de la profundidad en la malla.

$$\vec{\tau} = (\tau_x, \tau_y) = \frac{C_d \sqrt{U^2 + V^2}}{d^2} \vec{v}.$$

La notación usada es la siguiente:

- x, y = Coordenadas cartesianas en el plano $z = 0$,
donde $z = 0$ es el promedio del nivel del mar
- t = Tiempo
- η = Elevación de la superficie del mar con respecto
a $z = 0$
- h = Profundidad del agua con respecto a $z = 0$
- H = $\eta + h$ es la profundidad total
- \vec{v} = Vector velocidad con componentes u y v
- U, V = Componentes horizontales de transporte
(uH, vH)
- f = $2\Omega \sin(\varphi)$ es el parámetro de Coriolis, y se
asume que es constante ($f = 7.1816 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)
- C_d = Coeficiente de fricción (4.4×10^{-3})
- ν = Coeficiente de viscosidad de remolino
($10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
- g = Aceleración debida a la gravedad (9.81 m s^{-2})

En la derivación de estas ecuaciones se asume que las velocidades son independientes de la profundidad [Crean, 1978]. Las ecuaciones del modelo se resuelven explícitamente por el método de diferencias finitas.

El área del Golfo de California es representada por un sistema de líneas de malla ortogonales. La malla se caracteriza por un punto central de elevación, mientras que los componentes normales de la velocidad, verticalmente integrados, son evaluados a la mitad de los lados de la malla (Figura 5).

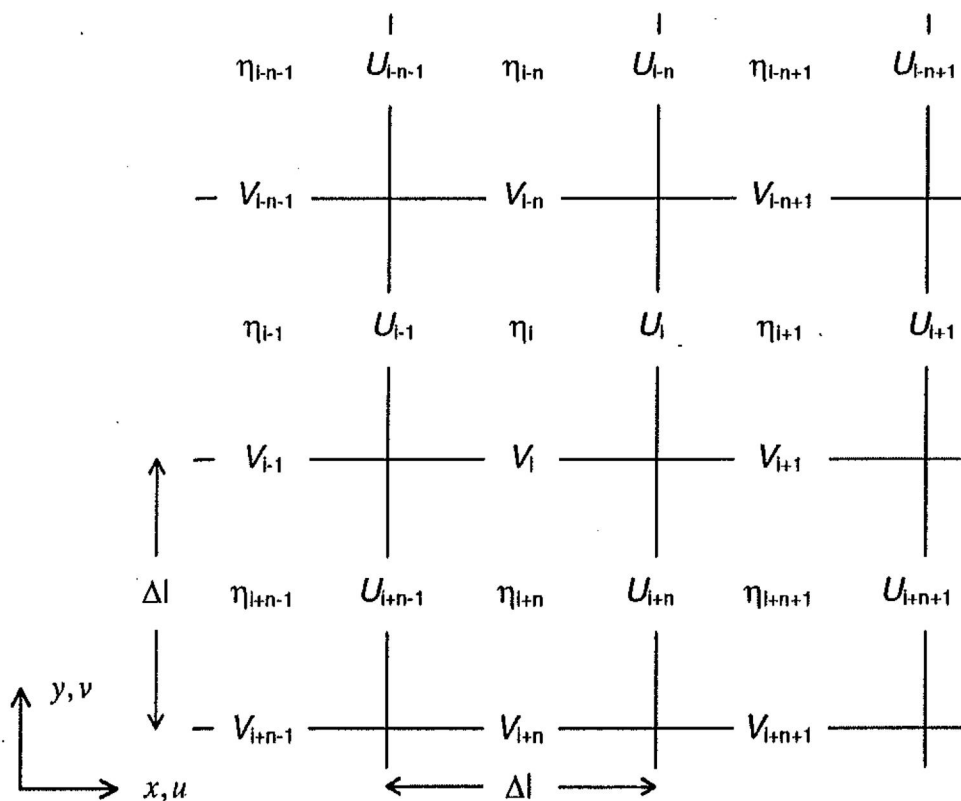


Figura 5. Notación de la malla bidimensional. Los puntos η son los lugares donde las elevaciones son calculadas y las profundidades especificadas. Las componentes de transporte son calculadas en los puntos U y V , respectivamente.

Como condición de frontera se estableció que la velocidad normal a la costa es nula, es decir,

$$\vec{V}_n = 0,$$

donde \vec{V}_n es la velocidad normal a la costa.

En las fronteras abiertas los valores de elevación de la superficie del mar, η , fueron especificados, para todos los tiempos, a partir de observaciones de marea. Los pasos de tiempo usados (Tabla 1) que producen soluciones estables deben satisfacer el criterio Courant-Friedrichs-Lewy [Courant et al., 1928], el cual es

$$\Delta t \leq \frac{\Delta l_{\min}}{\sqrt{2 g H_{\max}}}.$$

2.3 Simulación Numérica

Dado que el objetivo de este trabajo es conocer los cambios que se producen en la modelación de las corrientes residuales al cambiar única y exclusivamente el tamaño de malla, las corridas se llevaron a cabo usando los mismos coeficientes de fricción, C_d , y de viscosidad, ν , utilizados por Marinone [1996] ($C_d = 4.4 \times 10^{-3}$ y $\nu = 10^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

La duración de todas las simulaciones fue de 30 ciclos de marea (372.6 horas), y se observó que el patrón de circulación residual haya alcanzado un estado estacionario.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo en una computadora Axil 311 con 32 380 K de memoria.

3. Resultados

3.1 Las mareas

El comportamiento de la marea no cambió al utilizar diferente resolución. Como ejemplos, las Figuras 6, 7 y 8 muestran la distribución de amplitudes y fases de la marea modelada para tres tamaños de malla (12, 6 y 2 km). En ellas se puede observar la disminución de la amplitud y el cambio rápido de fase de la marea en la parte central del golfo (cerca del punto amfidrómico), así como la gran amplificación de la amplitud de la marea en la región norte. Estos resultados son muy similares a los reportados por *Morales y Gutiérrez*, [1989].

Las amplitudes y fases, modeladas y observadas, en diferentes estaciones alrededor del golfo se muestran en las Tablas 2 y 3. En ellas se puede observar que los resultados obtenidos son consistentes para todos los tamaños de malla. Una inspección minuciosa de las diferencias entre los resultados del modelo y las observaciones indica que éstas son mínimas para casi todas las estaciones (ver Tablas 2, 3 y 4); sin embargo, en San Felipe y Puerto Peñasco, localizados en la parte norte del golfo, las diferencias de las amplitudes son considerables (15.5 y 19.6 %, respectivamente).

En esta parte del trabajo surgió la siguiente pregunta:

- ¿Se necesitará calibrar el modelo para obtener mejores resultados en la región norte del golfo?

Para resolverla, nuevas simulaciones se realizaron variando el coeficiente de fricción (0.003 y 0.001). Estos experimentos se llevaron a cabo únicamente con las mallas de 4, 6, y 14 km. Las diferencias entre los nuevos resultados (amplitudes y fases) y los anteriores fueron muy pequeñas. Se concluyó que las diferencias entre los resultados del modelo y las observaciones, principalmente en la parte norte del golfo, no se debían a un problema de calibración por fricción.

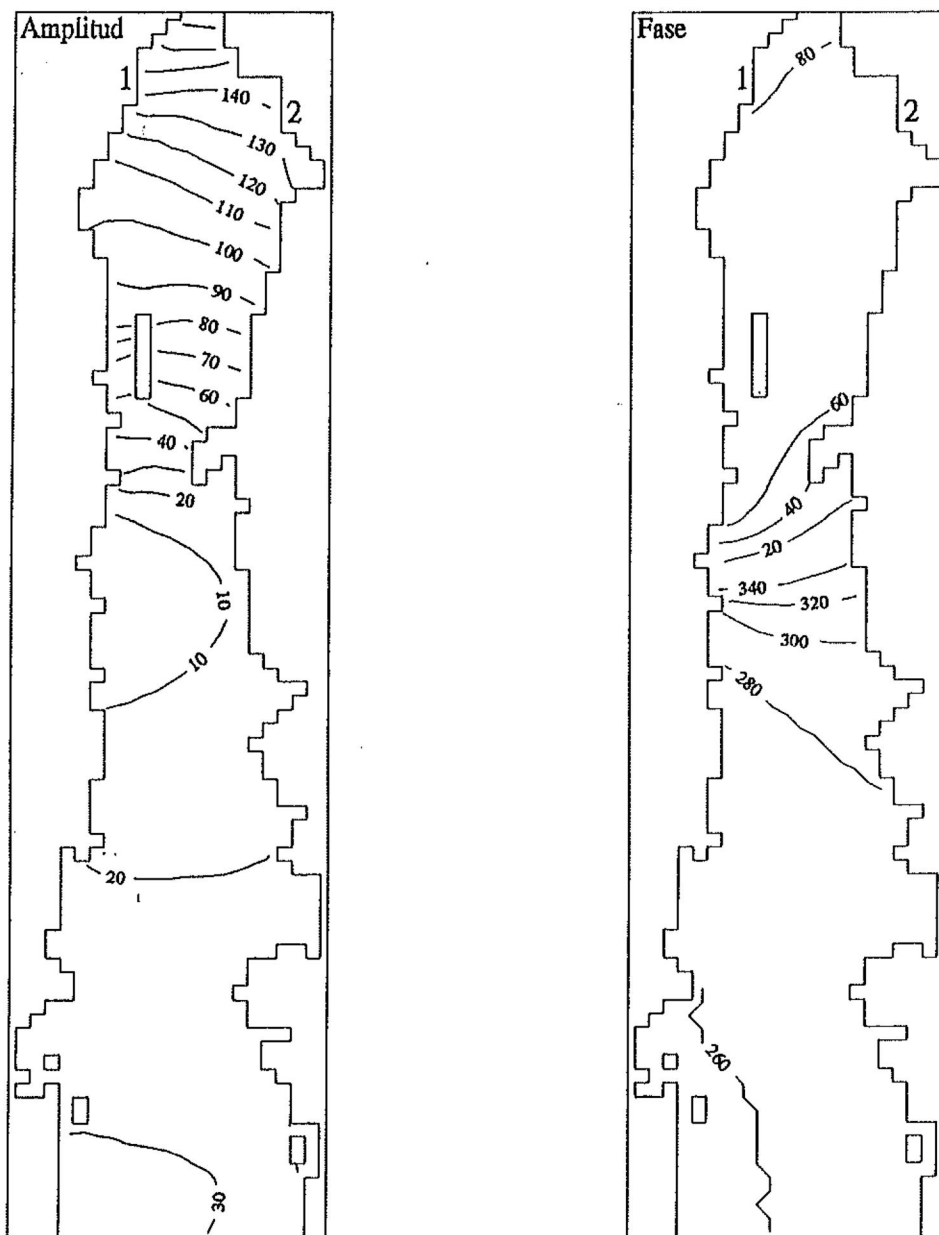


Figura 6. Mapa cotidal de la marea modelada para el tamaño de malla de 12 km. Las amplitudes están en centímetros y las fases en grados con respecto a Greenwich. Se muestra la ubicación de San Felipe (1) y Puerto Peñasco (2).

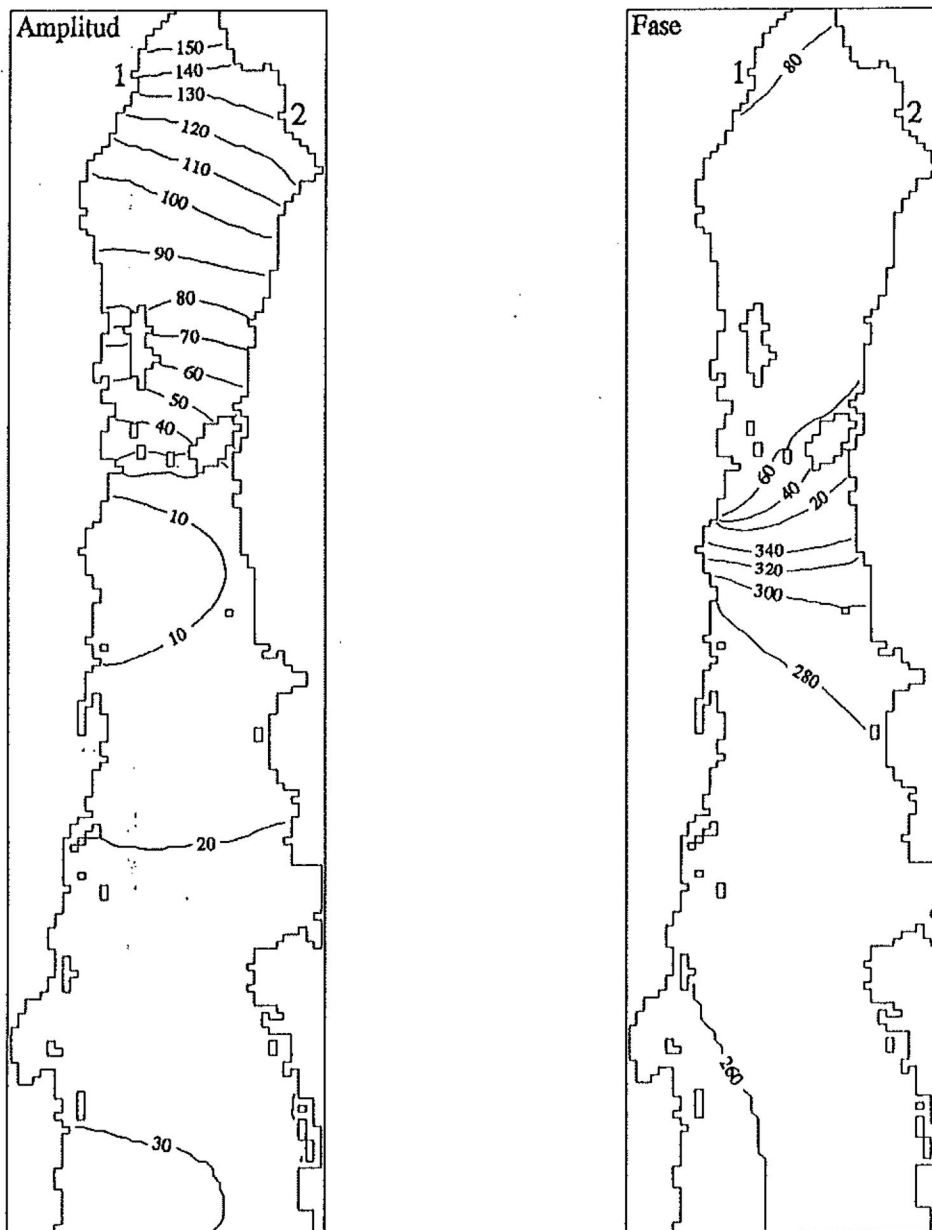


Figura 7. Mapa cotidal de la marea modelada para el tamaño de malla de 6 km. Las amplitudes están en centímetros y las fases en grados con respecto a Greenwich. Se muestra la ubicación de San Felipe (1) y Puerto Peñasco (2).

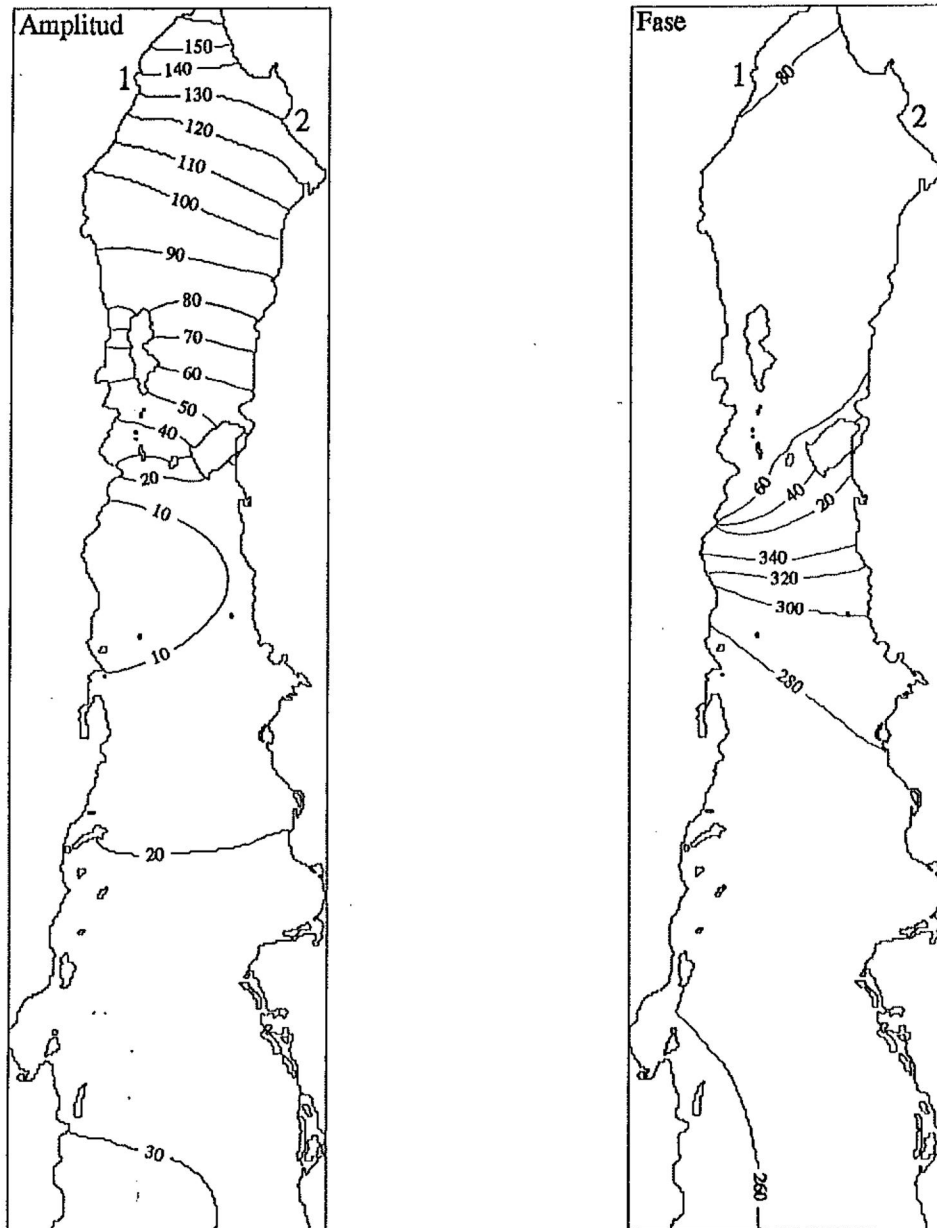


Figura 8. Mapa cotidal de la marea modelada para el tamaño de malla de 2 km. Las amplitudes están en centímetros y las fases en grados con respecto a Greenwich. Se muestra la ubicación de San Felipe (1) y Puerto Peñasco (2).

Tabla 2. Amplitudes (cm) modeladas, para los distintos tamaños de malla, y observadas (A_{obs}) en diferentes estaciones alrededor del golfo (ver Figura 2a para su ubicación).

Tamaño de malla	San Felipe	Puerto Peñasco	Santa Rosalía	Guaymas	Loreto	Topolobampo	La Paz
14	126.0	117	10.70	16.9	20.8	28.7	28.8
12	143.0	133	5.54	12.4	16.7	28.6	27.9
10	140.0	126	7.23	13.6	18.2	28.2	27.3
8	141.0	127	7.32	13.6	18.0	28.5	27.4
7	139.0	126	7.72	14.1	18.8	28.8	27.3
6	142.0	128	7.03	13.7	18.5	28.3	27.7
5	139.0	126	6.97	13.5	18.0	29.4	27.4
4	141.0	127	6.80	13.6	18.1	28.9	27.1
3	139.0	126	7.27	13.9	18.4	29.1	27.6
2	140.0	127	6.87	13.5	17.9	29.5	27.5
A_{Obs}	164.5	157	9.20	13.5	14.5	29.3	23.7

Tabla 3. Fases (grados con respecto a Greenwich) modeladas, para los distintos tamaños de malla, y observadas (ϕ_{Obs}) en diferentes estaciones alrededor del Golfo de California (ver Figura 2a para su ubicación).

Tamaño de malla	San Felipe	Puerto Peñasco	Santa Rosalía	Guaymas	Loreto	Topolobampo	La Paz
14	79.2	67.4	277.0	282.0	263.0	264.0	259.0
12	80.9	69.8	288.0	292.0	263.0	266.0	259.0
10	82.8	70.2	278.0	287.0	261.0	266.0	258.0
8	82.8	69.8	279.0	287.0	262.0	265.0	259.0
7	82.7	69.5	278.0	286.0	262.0	266.0	259.0
6	82.6	70.1	278.0	285.0	261.0	265.0	259.0
5	82.6	70.2	278.0	286.0	262.0	266.0	259.0
4	82.4	69.3	281.0	287.0	262.0	266.0	259.0
3	82.6	69.9	279.0	285.0	262.0	266.0	259.0
2	82.5	69.8	280.0	287.0	262.0	267.0	259.0
ϕ_{Obs}	64.9	58.6	354.1	315.8	275.8	297.9	274.9

Tabla 4. Promedio de las diferencias que existen en amplitud (cm) y fase (grados con respecto a Greenwich) entre los valores modelados (A_{Mod} y ϕ_{Mod}) y observados (A_{Obs} y ϕ_{Obs}) para cada tamaño de malla. La letra n denota el número total de estaciones (mostradas en las Tablas 2 y 3), mientras que i representa a cada una de ellas. La desviación estándar indica la consistencia de los resultados.

Tamaño de malla	$\frac{\sum_{i=1}^n (A_{Mod} - A_{Obs})_i}{n}$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\phi_{Mod} - \phi_{Obs})_i}{n}$
14	-9.0	-21.5
12	-6.4	-17.6
10	-7.3	-19.9
8	-7.0	-19.6
7	-7.1	-19.8
6	-6.6	-20.2
5	-7.3	-19.7
4	-7.0	-19.3
3	-7.2	-21.2
2	-7.1	-19.2
Desviación estándar	0.7	1.1

Posteriormente se compararon las batimetrías elaboradas en este trabajo con la usada por *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996]. Dos aspectos de su batimetría difieren con las de este trabajo: su malla (de 6.47618 km) está suavizada y la discretización en la cabeza del golfo tiene la forma de embudo (la fuente de la batimetría de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] se puede encontrar en *Argote et al.* [1995]).

Estas diferencias formularon nuevas preguntas:

- ¿Se necesitarán suavizar las mallas?
- ¿Afectará la discretización de la cabeza del golfo en las mallas (sin la forma de embudo del delta) para que no se forme resonancia suficiente en la parte norte?

De nuevo, muchas simulaciones fueron llevadas a cabo con las batimetrías (suavizadas e incluyendo o no la forma de embudo) de 3, 4, 5, 6, 12 y 14 km. Los resultados permanecieron siendo los mismos. Por tanto, ni el suavizado de las batimetrías ni la forma de las mallas en la cabeza del golfo explicaban las diferencias de los resultados del modelo con las observaciones en la parte norte del golfo.

Esto nos llevó a una última pregunta:

- ¿Cuánto afectará la discretización en la zona de las islas para obtener mejores resultados en la región norte del golfo?

Para resolverla, primero se elaboró una batimetría del mismo tamaño de malla que la usada por *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] (esta nueva batimetría fue elaborada con el mismo método empleado en las otras mallas de este trabajo). La Tabla 5 muestra las características de ambas batimetrías.

Posteriormente se llevó a cabo una simulación con la malla de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] para corroborar los resultados de *Marinone* [1996] (simulación 1 en Tabla 6), y se diseñaron algunos experimentos con la nueva batimetría de 6.47618 km de este trabajo (simulaciones 2-5 en Tabla 6).

Tabla 5. Comparación entre la malla de 6.47618 km elaborada para este trabajo y la utilizada por *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996]. Se muestran el número de renglones (*nr*), número de columnas (*nc*), área de la malla (A_{malla}), área del golfo (A_{golfo}) y profundidad máxima (H_{max}) de cada malla.

	Presente trabajo	<i>Argote et al.</i> [1996] y <i>Marinone</i> [1996]
Tamaño de malla (km)	6.47618	6.47618
nr	165	162
nc	41	40
A_{malla} (km ²)	283 730	271 777
A_{golfo} (km ²)	159 963	149 519
H_{max} (m)	3 563	3 657

Tabla 6. Simulaciones llevadas a cabo con la malla de 6.47618 km de este trabajo (2-5) y con la de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] (1). Se muestran las amplitudes (cm) observadas (A_{obs}) y las reportadas por *Argote et al.* [1996] (A_{Argote}) y *Marinone* [1996] ($A_{Marinone}$) en algunas estaciones del golfo.

	San Felipe	Puerto Peñasco	Santa Rosalía	Guaymas
A_{Obs}	164.5	157.0	9.2	13.5
A_{Argote}	163.0	153.0	4.0	11.0
$A_{Marinone}$	174.0	163.0	6.8	11.9
1	173.0	162.0	4.4	9.6
2	134.0	127.0	7.0	13.5
3	131.0	123.0	7.9	14.1
4	140.0	133.0	5.3	12.2
5	145.0	137.0	4.2	11.4
6	156.0	148.0	2.8	9.8

Simulación:

1. Simulación realizada con la batimetría de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996].
2. Simulación realizada con la batimetría de 6.47618 km de este trabajo.
3. La zona de las islas fue suavizada.
4. La profundidad de 11 puntos de malla (en el archipiélago) fue modificada arbitrariamente (promedio entre los puntos más cercanos).
5. La batimetría del experimento 4 fue suavizada.
6. La zona de las islas de la batimetría empleada por *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] fue incrustada en la de 6.47618 km de este trabajo.

Como se puede observar en la Tabla 6, la discretización de la batimetría en la zona de las islas y de los umbrales es determinante para la amplificación de la marea en la parte norte del golfo, y para su disminución cerca del punto anfidrómico. Pero, ¿por qué con la batimetría de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] se obtienen mejores resultados en la parte norte del golfo, mientras que con la otra de su mismo tamaño de malla no, si la discretización de ambas batimetrías es muy similar? (Figura 9). Un comentario sobre este punto será dado más adelante.

En base a los resultados de la Tabla 6, a que el comportamiento global de la marea en el golfo fue bien reproducido (ver Figuras 6, 7 y 8) y a que los cambios producidos en la circulación residual en todas las mallas, al cambiar la discretización en la zona de las islas, fueron mínimos (no mostrados), se decidió seguir con los resultados de este trabajo, obtenidos ellos sin modificación alguna de las mallas originales.

Al igual que las elevaciones de marea, las corrientes de marea no manifestaron cambios entre las diferentes batimetrías (como ejemplos, ver Figuras 10, 11 y 12). Se puede apreciar que a mayor resolución, la formación de remolinos, que finalmente dan origen a las corrientes residuales, es evidente (para una mejor apreciación, comparar las Figuras 10, 11 y 12 para el tiempo de 369.49 h).

3.2 La circulación residual

Las corrientes residuales se obtuvieron al promediar los últimos 25 ciclos de marea, y presentan un patrón de circulación residual bien definido en la parte norte del golfo, con corrientes del orden de 1 cm s^{-1} ; en cambio, en el archipiélago se presentaron los flujos residuales de mayor magnitud, con

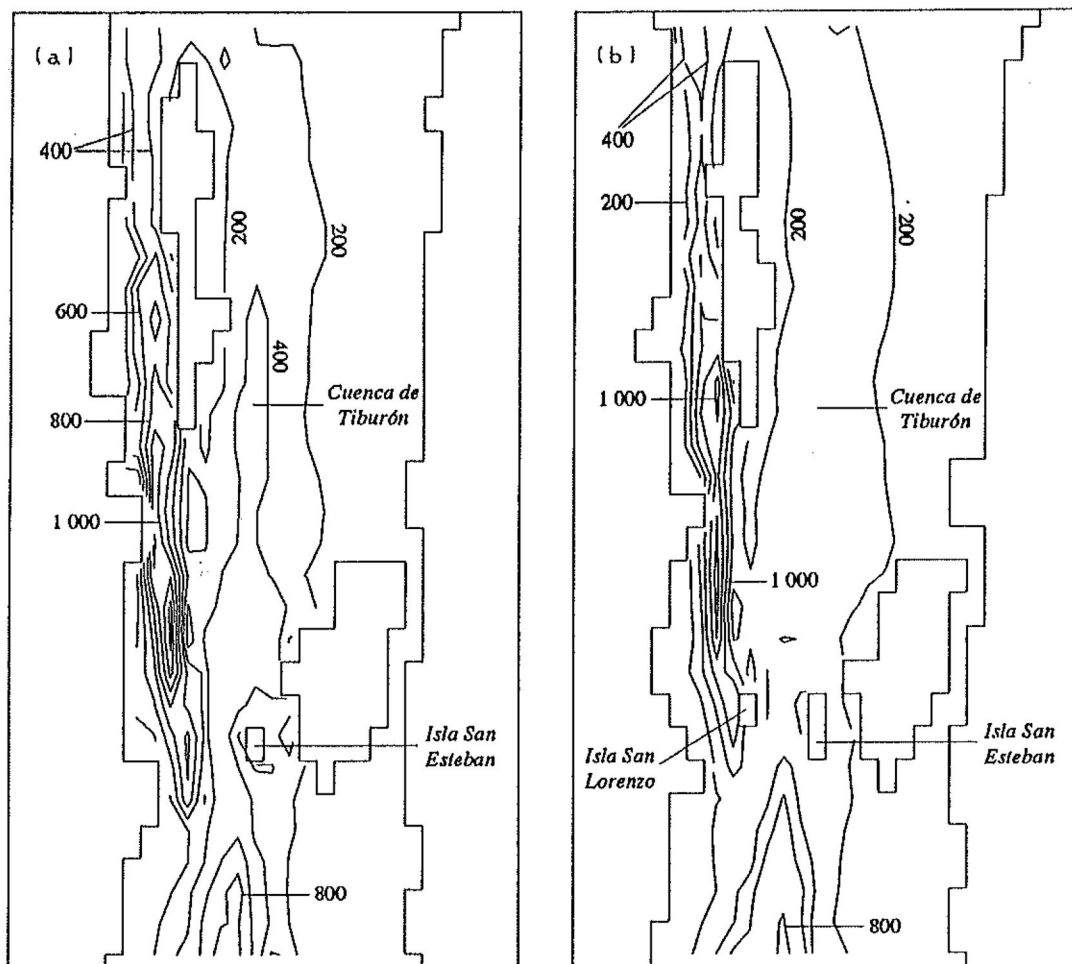


Figura 9. Batimetría (m) del archipiélago de a) malla utilizada por Argote *et al.* [1996] y Marinone [1996], y b) malla de 6.47618 km elaborada en este trabajo. El intervalo de los contornos es de 200 m. Los contornos de las dos batimetrías son muy parecidos, pero se observan algunas diferencias entre ellos (*e.g.* en la batimetría de este trabajo, la profundidad de la cuenca de Tiburón es de 300 m, y el tamaño de la isla San Esteban es el doble que el de la figura 9a; mientras tanto, en la figura 9a no aparece la isla San Lorenzo).

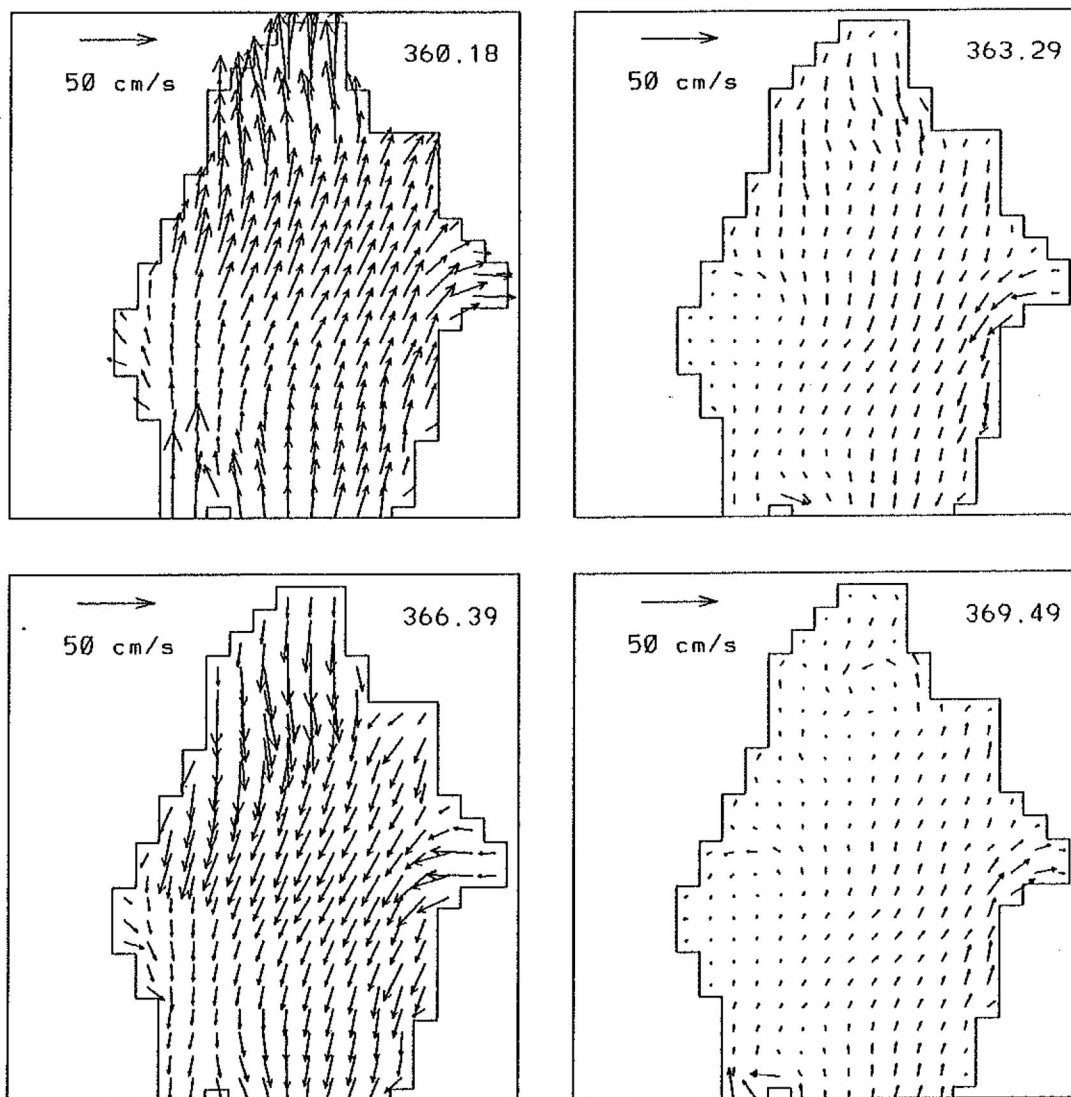


Figura 10. Velocidades (cm s^{-1}) de marea para la región norte del golfo para la malla de 12 km. El número de la esquina superior derecha indica el tiempo (en horas) en el que fue hecha la lectura.

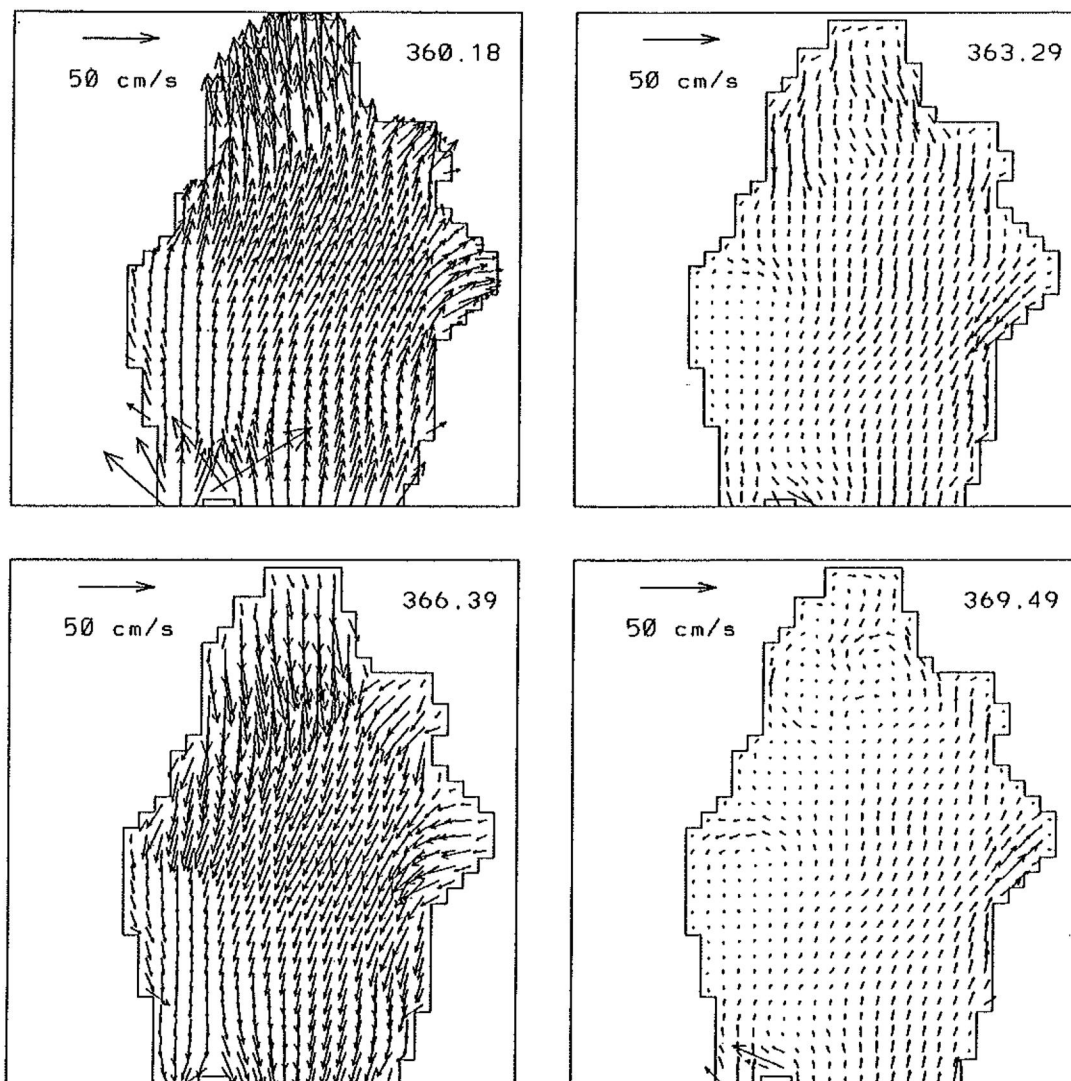


Figura 11. Velocidades (cm s^{-1}) de marea para la región norte del golfo para la malla de 8 km. El número de la esquina superior derecha indica el tiempo (en horas) en el que fue hecha la lectura.

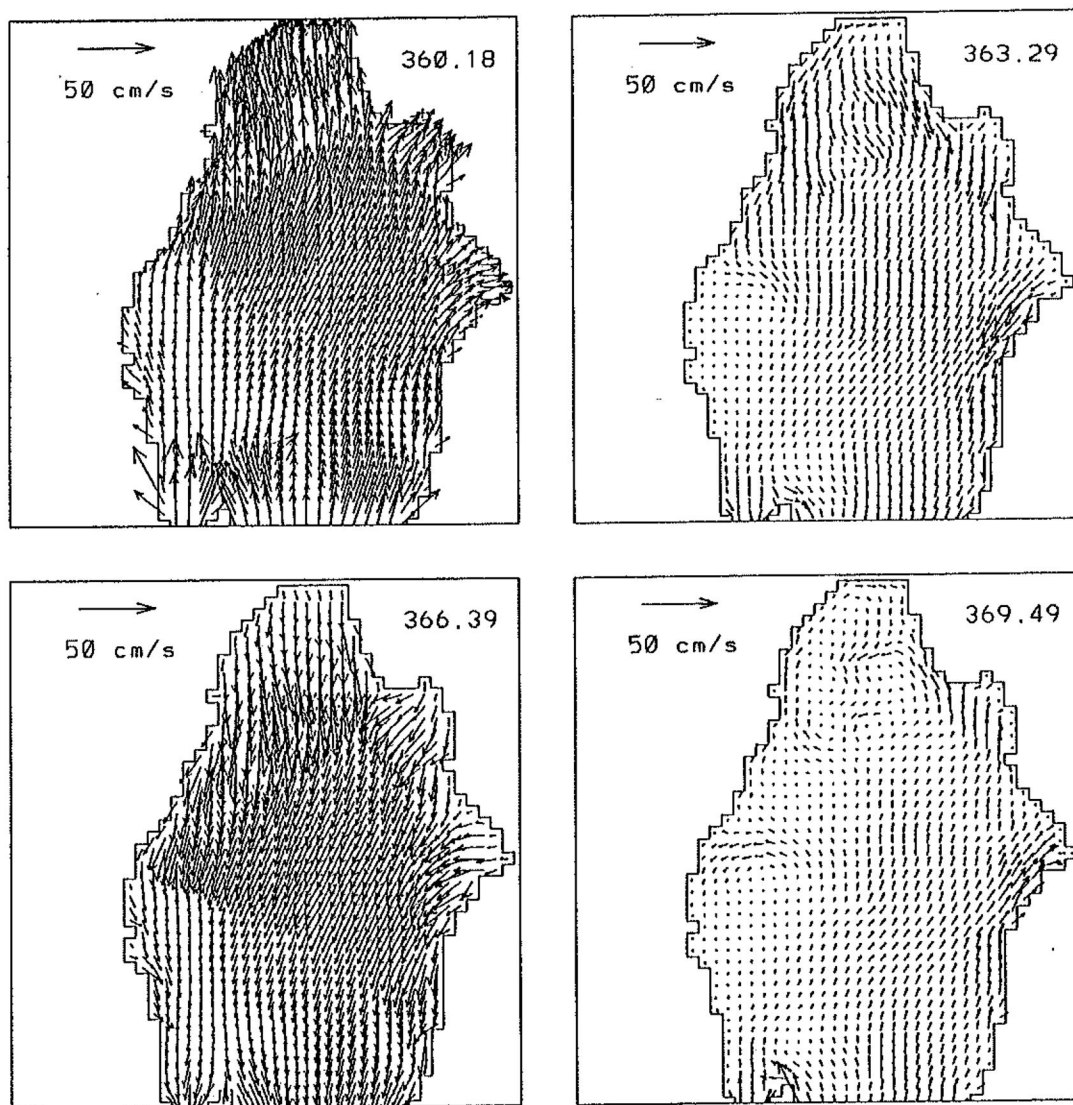


Figura 12. Velocidades (cm s^{-1}) de marea para la región norte del golfo para la malla de 6 km. El número de la esquina superior derecha indica el tiempo (en horas) en el que fue hecha la lectura.

velocidades de hasta 18 cm s^{-1} . En el resto del golfo no se encontró un patrón de circulación residual apreciable.

La Figura 13 muestra la circulación residual de todas las mallas en la región norte del golfo. Se puede observar que, en general, las corrientes residuales son similares en todas las batimetrías, tanto en estructura como en la magnitud de su velocidad, y que las mallas más finas representan mejor el campo de velocidad residual.

Las máximas velocidades se presentaron donde los gradientes de profundidad son mayores y, de hecho, la mayoría de las corrientes residuales están bien alineadas a los contornos. De esta forma, el principal flujo residual comienza al noreste de la isla Ángel de la Guarda y tiene dirección norte. Se aprecia también una circulación anticiclónica en la parte este (Bahía Adair y Bahía San Jorge; ver Figura 2b para su ubicación) y una ciclónica en la parte oeste (con pequeños giros cerca de la costa de Baja California). En el Alto Golfo se observa una circulación residual hacia el norte, mientras que una fuerte corriente que va de Puerto Peñasco a San Felipe (justo encima de la isóbata de 20 m) es notoria (*Argote et al.* [1996] no tiene esta corriente en sus resultados, pero *Marinone* [1996] sí).

Aunque todos los resultados son muy similares, existe una diferencia entre las Figuras 13a, 13e, 13f, 13h, 13j, 13k y 13l, y las Figuras 13b, 13c, 13d y 13i. Esta diferencia consiste en la circulación residual alrededor de la Cuenca del Delfín. En las primeras figuras, la circulación inicia al noreste de la isla Ángel de la Guarda, y se observa cómo la corriente residual le da la vuelta a la cuenca con un pequeño giro ciclónico, exactamente sobre los contornos de ésta; en cambio, en las segundas, la circulación se inicia al noroeste de la isla y presenta dirección noreste. Estas últimas figuras son las más parecidas a los resultados de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] para la M_2 (ver Figura 13g).

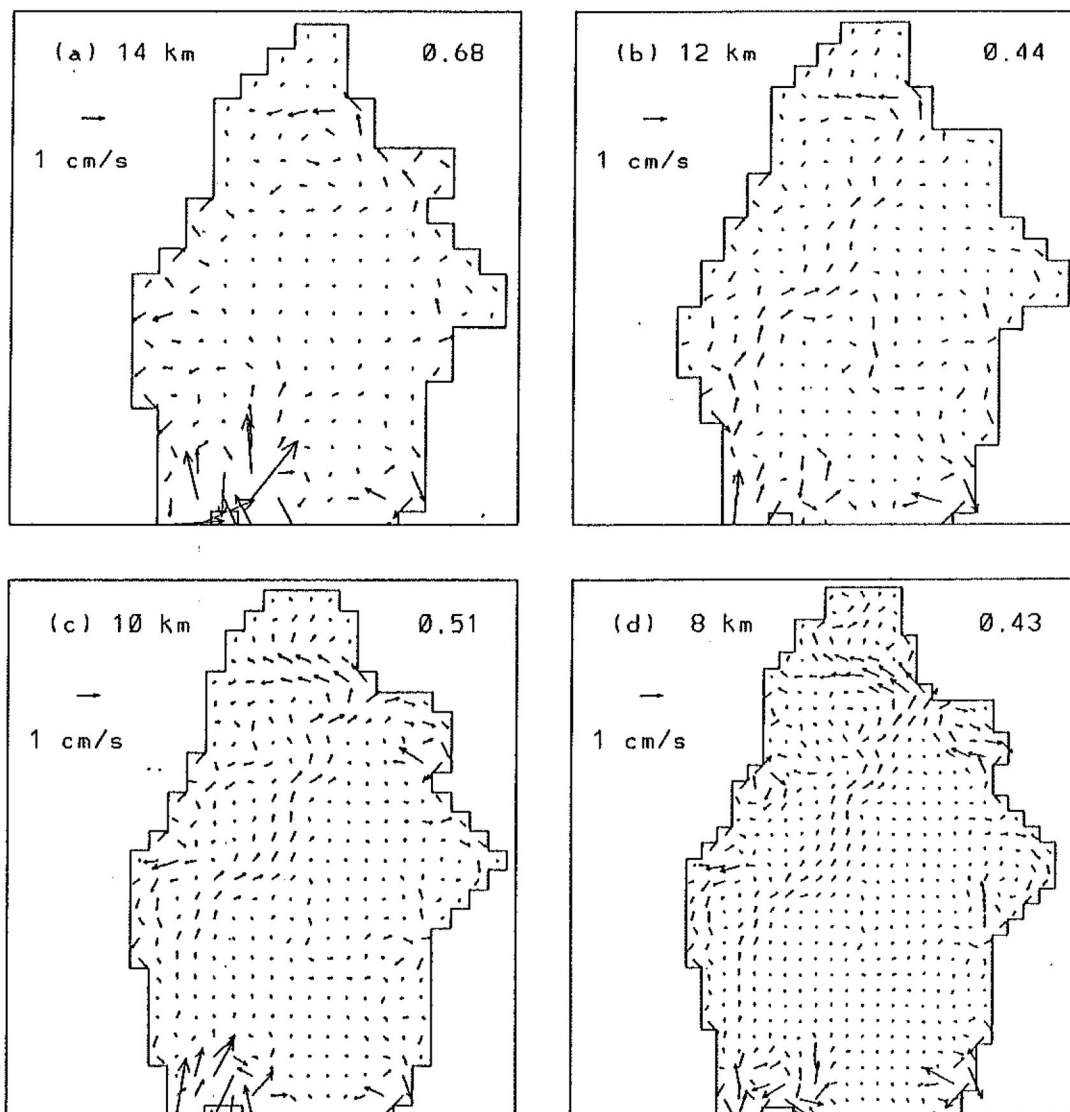
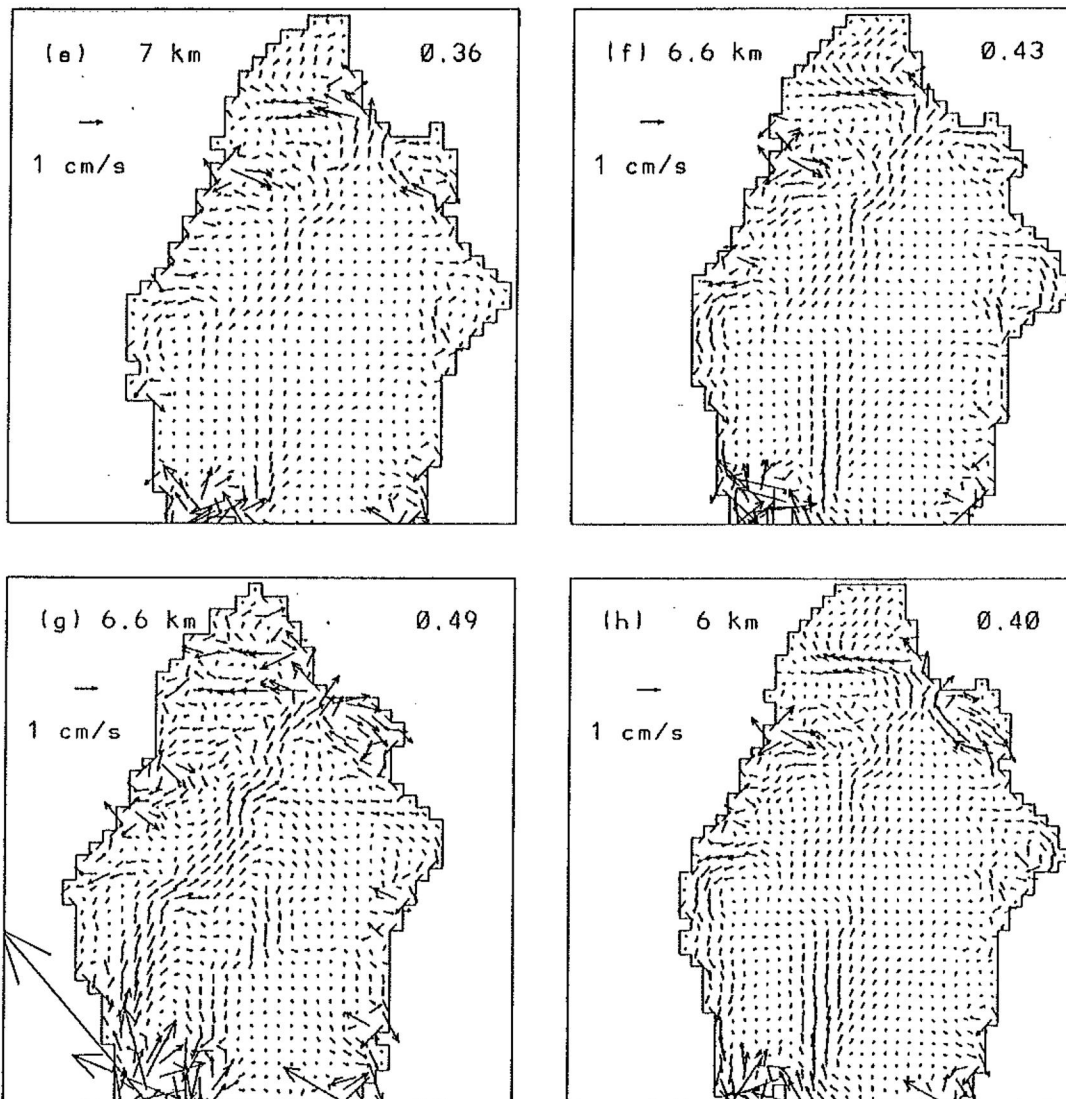
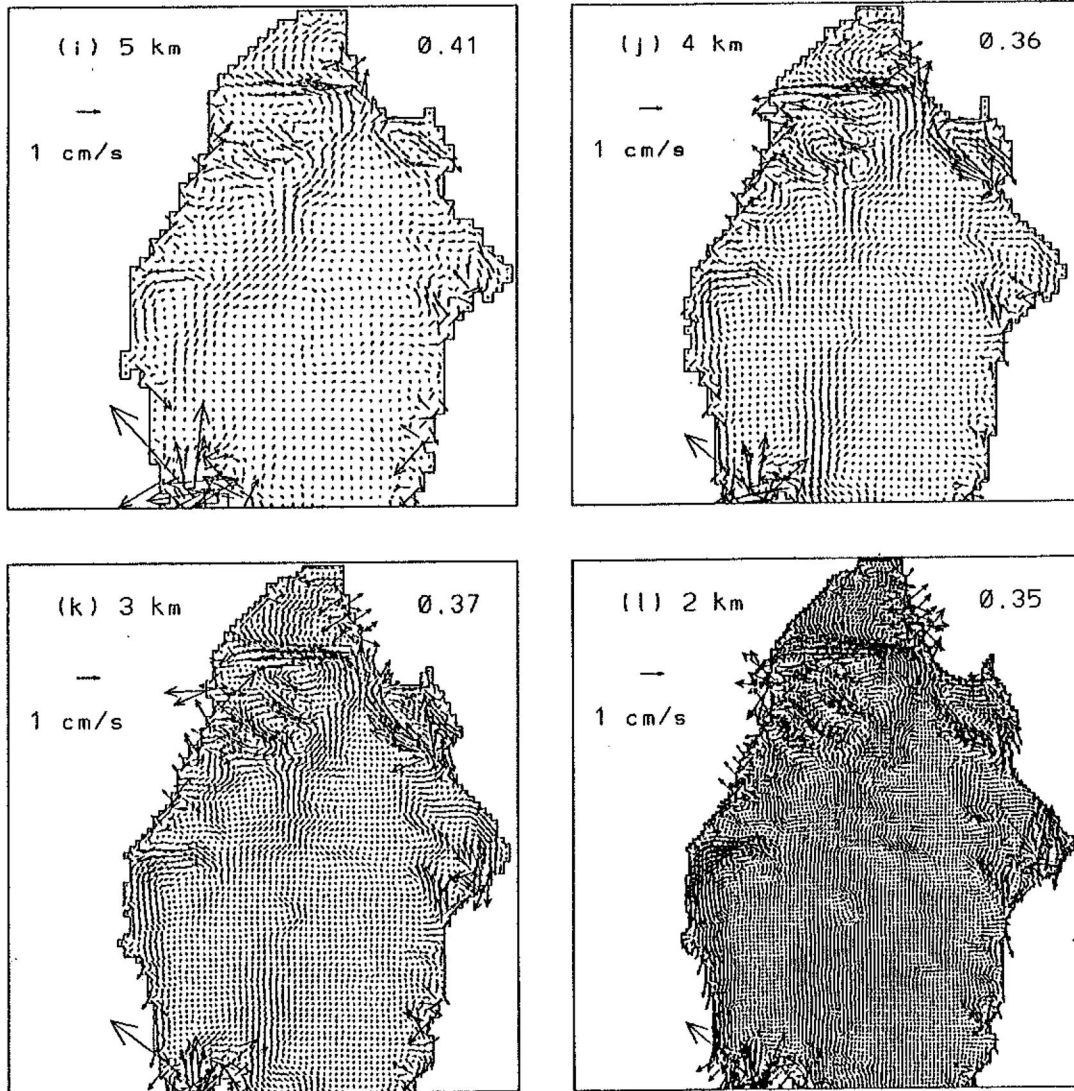


Figura 13. Circulación residual (cm s^{-1}) en la parte norte del golfo. Los números en la esquina superior derecha de cada figura son la raíz cuadrática media de la velocidad para el área mostrada.



Continuación Figura 13. La simulación de la Figura 13g fue llevada a cabo con la batimetría de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] (el patrón de circulación residual mostrado en esta figura es el mismo que el reportado por *Marinone* [1996] para la M_2).



Continuación Figura 13.

Finalmente, en el archipiélago, la presencia de un giro anticiclónico bien definido al noroeste de la isla Tiburón fue consistente a partir de la batimetría de 8 km hasta la de 2 km (se muestra como único ejemplo la Figura 14). Este último resultado es muy similar al reportado por *Argote et al.* [1996].

3.3 Disipación de energía

La circulación residual está asociada, además de los términos advectivos, a la fricción del fondo, y la interacción no lineal de la marea con la topografía, es precisamente a través de los términos de fricción. A manera de comparación con otros estudios, en este trabajo se calculó la disipación total de energía de la M_2 en todo el golfo (Tabla 7). La disipación fue similar para todas las mallas. Estos resultados son menores que los reportados en otros trabajos (ver Tabla 5 de *Argote et al.* [1995]), inclusive, el obtenido con la batimetría de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996]. La disipación de energía por unidad de área, se obtuvo al dividir la energía disipada en el golfo de cada malla entre su área.

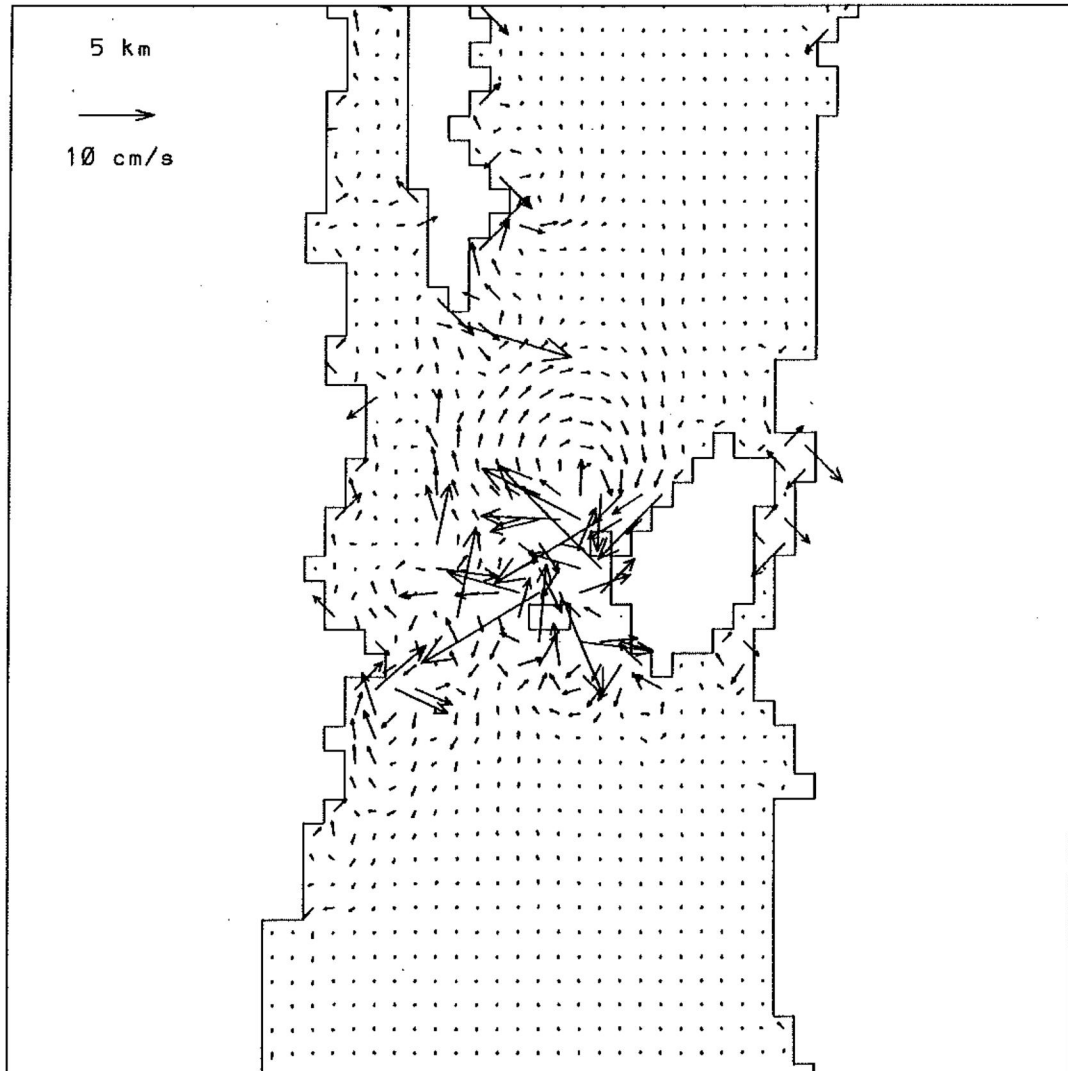


Figura 14. Circulación residual (cm s^{-1}) en el archipiélago del Golfo de California para la malla de 5 km.

Tabla 7. Disipación de energía de la marea (M_2) en el Golfo de California y por unidad de área. El tamaño de malla subrayado indica la simulación llevada a cabo con la batimetría de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996].

Tamaño de malla (km)	Energía (GW)	Energía (W km ⁻²)
14	2.0790	12 780
12	2.0543	12 795
10	1.7974	11 068
8	1.8806	11 754
7	1.8779	11 756
<u>6.47618</u>	1.7080	10 677
<u>6.47618</u>	2.9305	19 599
6	1.7409	10 850
5	1.7883	11 170
4	2.6453	16 546
3	2.0018	12 529
2	2.1016	13 198

4. Discusiones

Antes de iniciar una breve discusión sobre los resultados de la circulación residual del golfo, es conveniente retomar un punto no aclarado en la sección 3.1:

- ¿por qué con la batimetría de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] se obtienen mejores resultados (amplitudes y fases) en la parte norte del golfo, mientras que con la otra de su mismo tamaño de malla no, si la discretización de ambas batimetrías es muy similar?

Primero, hay que mencionar que los contornos de las dos batimetrías son muy parecidos para todo el golfo, y no únicamente para la zona del archipiélago.

Y segundo, los resultados de la simulación 4 de la Tabla 6 parecen tener la respuesta a esta interrogante. Estos resultados indican que la discretización en la zona de las islas es un factor determinante para la modelación de la marea en el centro y norte del Golfo de California, debido a que esa zona se encuentra cerca del punto amfidrómico. Esta simulación no indica que las mallas realizadas para este trabajo estén mal hechas, si no simplemente, muestra que la manipulación de las mallas en algunos puntos es determinante para obtener mejores resultados.

4.1 Circulación residual

En general, la circulación residual en la región norte del golfo fue consistente para todos los tamaños de malla. La diferencia en el patrón de circulación residual alrededor de la Cuenca del Delfín entre las Figuras 13a, 13e, 13f, 13h, 13j, 13k y 13l (mallas de 14, 7, 6.47618, 6, 4, 3 y 2 km), y las Figuras.13b, 13c, 13d y 13i (mallas de 12, 10, 8 y 5 km) no se debió a alguna falla en la discretización de las batimetrías en el archipiélago. Por ejemplo, en

el archipiélago, las mallas de 6 y 4 km muestran 5 islas, mientras que la de 5 km únicamente 3. Esto motivo a modificar el número de islas en todas las batimetrías. Se obtuvo que los cambios en el patrón de circulación residual en la parte norte del golfo fueron mínimos para todas las mallas. Esto se mencionó anteriormente en la sección 3.1.

En términos generales, los resultados de este trabajo concuerdan con los de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996], a excepción de la circulación residual alrededor de la Cuenca del Delfín. Se asume que esta diferencia se debe a la diferente discretización de su batimetría.

La circulación residual mostrada aquí, al igual que la de *Carbajal* [1993] (modelo bidimensional), *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996], difiere con la de *Quirós et al.* [1992]. *Marinone* [comunicación personal] investigó si esta diferencia se debía al tamaño de malla usado por *Quirós et al.* [1996]. Utilizó en su modelo la batimetría de *Quirós et al.* [1992] y encontró que las diferencias de sus resultados con los de *Quirós et al.* [1992] no se debían a la resolución. Esta premisa es aceptada también en este trabajo.

Una causa de las diferencias entre los resultados de *Argote et al.* [1996] y *Marinone* [1996] con los de *Durazo* [1989] puede ser el forzamiento de la marea que utilizó *Durazo* [1989] [*Marinone*, 1996]. Esto puede ser correcto, ya que el modelo utilizado por *Durazo* [1989] y *Argote et al.* [1996] es el mismo. Sin embargo, permanece la duda sobre si la resolución utilizada por *Durazo* [1989] reproduce fielmente el patrón de circulación residual alrededor de la Cuenca del Delfín, dado que los resultados del presente trabajo coinciden perfectamente con los de él en esa zona (recordar que *Durazo* [1989] forzó justo al norte del archipiélago).

Aunque la mayoría de los resultados muestran la principal corriente residual de la parte norte del golfo, no todas las resoluciones son apropiadas para una buena apreciación de los vórtices de esa región. *Kuipers y*

Vreugdenhil [citados por *Crean et al.*, 1988] estimaron que cerca de cinco puntos de malla son necesarios para la adecuada resolución numérica de un remolino. Indudablemente, las resoluciones de 2 y 3 km son las mejores para observar estos giros en la parte norte del golfo. Sin embargo, la simulación con la malla de 2 km es muy costosa en comparación con la de 3 km (*e.g.* para la malla de 2 km, la duración es de ~ 66 horas, mientras que para la de 3 km es de ~ 16 horas). Por tanto, para este trabajo, la resolución de 3 km es suficiente para representar el campo de velocidad residual en la parte norte del golfo, tomando en cuenta que la excursión de marea en esa región es de ~ 3 km.

5. Conclusiones

1. La modelación de la marea en el golfo no fue sensible al utilizar diferentes tamaños de malla.
2. La discretización de la batimetría en la zona de las islas es determinante en la modelación de la marea en el centro y norte del golfo.
3. Para todos los tamaños de malla se obtuvo un patrón de circulación residual bien definido en la parte norte del golfo. Los cambios que presentó este patrón al utilizar las diferentes batimetrías fueron alrededor de la cuenca del Delfín, y no se debieron a alguna falla en la discretización del archipiélago (número de islas) de las mallas.
4. La magnitud de las corrientes residuales en la parte norte del golfo fue consistente para todas las mallas ($\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$).
5. Al noroeste de la isla Tiburón se obtuvo un giro anticiclónico bien definido a partir de la malla de 8 km hasta la de 2 km.
6. Las máximas velocidades residuales en todas las batimetrías se obtuvieron en el archipiélago y alcanzaron velocidades de hasta 18 cm s^{-1} .
7. La malla de 3 km es una buena resolución del campo de velocidad residual en la parte norte del golfo.

6. Recomendaciones

Para lograr una mejor modelación de las corrientes residuales del Golfo de California, se requiere de una buena representación de la batimetría del área de estudio. Se deben incluir sondeos nuevos que abarquen rasgos básicos del golfo, como los canales y umbrales del archipiélago, que tienen escalas de cientos de metros [Amador, comunicación personal]. A partir de esta nueva batimetría, se pueden generar mejores mallas de diferentes resoluciones, dependiendo del interés de la investigación.

7. Literatura citada

- Argote, M.L., A. Amador, y M.F. Lavín, Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, 100, 16, 103-16, 118, 1985.
- Argote, M.L., A. Amador, y M.F. Lavín, Barotropic residual circulation in the Gulf of California due to the M_2 tide and wind stress, Enviado a *J. Geophys. Res.*, 1996.
- Badan-Dangon, A., M.C. Hendershott, y M.F. Lavín, Underway Doppler Current Profiles in the Gulf of California, *Eos, Trans. Am. Geophys. Union.*, 72(19), 209, 217-218, 1991.
- Carbajal, N., Modelling of the circulation in the Gulf of California, Tesis Doctoral, 186 pp, Universidad de Hamburgo, Alemania, 1993.
- Courant, R., K. Friedrichs, y H. Lewy, Über die partiellen differenzgleichungen der mathematischen physik, *Math. Annalen*, 100, 32-74, 1928.
- Crean, P., A numerical model of barotropic mixed tides between Vancouver Island and the mainland and its relation to studies of the estuarine circulation, en *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, editado por J. Nihoul, pp. 283-314, Elsevier, New York, 1978.
- Crean, P., T. Murty y J. Stronach, Mathematical modeling of tides and estuarine circulation. En *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, Springer-Verlag, 30:XV, 471 pp., 1988.
- De León, A. y P. Ripa, Hacia un entendimiento de la marea en el Golfo de California, en *Memorias de la Reunión Anual 1987*, editado por J. Gonzalez, F. Medina, M. Romo y M. Martínez, pp. 206-213, Unión Geofísica Mexicana, México, D.F., 1989.
- Dressler, D., Investigación sobre mareas y efectos del viento en el Golfo de California, mediante un modelo H-N. Sammlung von Publikationen

- Dressler. Nr 2, manuscrito no publicado: 1-26, 1981.
- Durazo, R., Frentes térmicos de verano en el alto Golfo de California, Tesis de Maestría, 66 pp., C.I.C.E.S.E., B.C., México, 1989.
- Filloux, J.H., Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California, *Nature*, 243, 217-221, 1973.
- García, G., M. Ortíz, y S.G. Marinone, Isóbatas Digitalizadas del Golfo de California, Informe Técnico con clave CTOF9601 para publicarse en el Compendio de Productividad de 1996 del CICESE, México.
- Grijalva, N., Tidal computation in the Gulf of California, *Geofis. Int.*, 12, 13-34, 1972.
- Hendershoot, M.C. y A. Speranza, Co-oscillating tides in long narrow bays; the Taylor problem revisited, *Deep Sea Res.*, 18, 959-980, 1971.
- Marinone, S.G. y J. Fyfe, Residual Currents in the Central Strait of Georgia, *B.C. ATMOSPHERE-OCEAN*, 30(1), 94-119, 1992.
- Marinone, S.G., Tidal residual currents in the Gulf of California: is the M_2 tidal constituent sufficient to induce them?, Enviado a *J. Geophys. Res.*, 1996.
- Morales, R.A. y G. Gutiérrez, Mareas en el Golfo de California, *Geofis. Int.*, 28, 25-46, 1989.
- Pingree, R.D. y L. Maddock, Rotary currents and residual circulation around banks and islands, *Deep Sea Res.*, 32, 929-947, 1985.
- Quirós, G., A. Badan-Dangon, y P. Ripa, M_2 currents and residual flow in the Gulf of California, *Neth. J. Sea Res.*, 28, 251-259, 1992.
- Ripa, P. y G. Velázquez, Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofis. Int.*, 32, 41-56, 1993.
- Robinson, I.S., Tidally induced residual flows. En *Physical oceanography of coastal and shelf seas*. B. Johns ed., Elsevier, NY, 470 pp., 1983.
- Roden, G.I. y G.W. Groves, Recent Oceanographic Investigations In The Gulf

- Of California, *J. Mar. Res.*, 18, 10-35, 1959.
- Stock, G.G., Modeling tides and dissipation in the Gulf of California, Tesis Doctoral, 102 pp., Scripps Institute of Oceanography, Universidad de California, San Diego, La Jolla, 1976.
- Tee, K.T., Tide-induced residual current, a 2-D nonlinear numerical tidal model, *J. Mar. Res.*, 34, 603-628, 1976.
- Tee, K.T., Tide-Induced Residual Current-Verification of a Numerical Model, *J. Phys. Oceanogr.*, 7, 396-402, 1977.
- Zimmerman, J.T.F., Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) current, *Geophys. Astrophys. Fl. Dyn.*, 11, 35-47, 1978.
- Zimmerman, J.T.F., Vorticity transfer by tidal currents over an irregular topography, *J. Mar. Res.*, 38, 601-630, 1980.