

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



CICESE

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**"CORRIENTES EN LA REGIÓN CENTRAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA A PARTIR DE
UN PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRIENTES MONTADO EN UN BARCO"**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

JOB ISRAEL LINO PÉREZ

Ensenada, Baja California, México. Diciembre del 2004.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



CICSE

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**"CORRIENTES EN LA REGIÓN CENTRAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA A PARTIR
DE UN PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRIENTES MONTADO EN UN BARCO"**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

JOB ISRAEL LINO PÉREZ

Ensenada, Baja California, México. Diciembre del 2004.

RESUMEN de la tesis que presenta Job Israel Lino Pérez, como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFÍA FÍSICA. Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 2004.

CORRIENTES EN LA REGIÓN CENTRAL DEL GOLFO DE CALIFORNIA A PARTIR DE UN PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRIENTES MONTADO EN UN BARCO.

Resumen aprobado por:



Dr. Juan Manuel López Mariscal
Director de tesis

En este trabajo se estiman las corrientes de marea en la zona de las islas centrales del golfo a partir de un ajuste por mínimos cuadrados a los datos recolectados por un perfilador acústico de corrientes montado en un barco. Las variaciones espaciales de la amplitud y la fase se aproximan mediante polinomios cuyos coeficientes se obtienen mediante el ajuste por mínimos cuadrados. Esta técnica permite separar las corrientes de marea de la componente subinercial. Se presentan los resultados de aplicar el ajuste a los perfiles de corriente obtenidos durante dos cruces oceanográficos en marzo de 2002 y mayo de 2003. Las corrientes de marea promediadas verticalmente son muy rectilíneas y alineadas con el eje del golfo. Las amplitudes máximas se encontraron en la parte norte del canal de Ballenas y las fases de las corrientes de la M_2 y S_2 aumentan ligeramente hacia el sur, contrario al comportamiento de las fases del nivel del mar. El ajuste básico se compara razonablemente bien con las corrientes de anclajes en la parte norte de la zona de estudio, pero subestima las corrientes y tiene un desfase de más de una hora en la parte sur. Se consideran algunas variaciones del método para mejorar el ajuste que incluye condiciones de frontera a lo largo de las costas, incorporación de datos de correntímetros anclados, los cuales permitieron una buena comparación con las corrientes de marea en las localidades de los anclajes. La incorporación de algunas constantes armónicas de nivel del mar al ajuste, permitió obtener mapas cotidales de la elevación que se comparan razonablemente con los obtenidos exclusivamente a partir de constantes del nivel del mar. En la parte norte de la zona de estudio, las corrientes máximas a la cabeza anteceden en 90° a la elevación máxima, pero en la parte sur este desfase se reduce como unos 20° . Se ajustó también el transporte, sin embargo al estimar los parámetros de las elipses, se presentan dificultades debido a que el método no parece captar bien las variaciones en la batimetría. Los cálculos indican que el flujo total de agua que pasa transversalmente en el golfo por los estrechos de las grandes islas es de 10.8 Sv debido a las componentes M_2 y S_2 durante mareas vivas, el prisma

de marea de $1.51 \times 10^{11} \text{ m}^3$ y el rango de marea promedio de 3.34 m. Con la mayor cantidad de observaciones posibles, tanto del perfilador montado en el barco, como de correntímetros anclados, el método puede ser efectivo para obtener los parámetros de las componentes mas importantes de las corrientes en el Golfo de California.

Palabras clave: Golfo de California, corrientes de marea y ADCP.

ABSTRACT of thesis of Job Israel Lino Pérez, presented as partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in PHYSICAL OCEANOGRAPHY. Ensenada, Baja California, México. December of 2004.

We estimate the tidal currents in the islands zone of the Gulf of California using a least square method applied to ADCP data collected aboard a research vessel. Spatial variations of amplitude and phase of the currents are approximated by polynomials whose coefficients are determined by a least square fit. This technique allows the separation of the tidal currents from the subinertial currents. We present results of the least square fit to current profiles obtained during two cruises in March 2002 and May 2003. Barotropic tidal currents are rectilinear and aligned with the axis of the gulf. Maximum amplitudes were found in the northern part of Ballenas Channel, and phases of the M_2 and S_2 components increase slightly towards the south, which is contrary to the behavior of tidal elevation phases. A basic fit, using only shipboard ADCP data, compares well with moored ADCP data in the northern part. However, it underestimates the amplitude and obtains phase differences of about an hour in the southern part. Some variations of the basic fit include the use of non-normal flow boundary conditions at coasts and the use of moored data, which improved significantly the comparison with that same data in the southern part. Harmonic constants of tidal elevation data were also included in the fit, and the cotidal elevation maps obtained compared well with observed cotidal maps even in regions with scarce data. In the northern part of the domain, currents towards the head lead maximum elevations by 90° , but this phase difference is reduced by about 20° in the southern part. A fit to transport was also made. However, the method did not capture well reductions of transport towards shallow water. Mapped tidal currents were used to estimate a transport of 10.8 Sv into the northern gulf, with a corresponding tidal prism of $1.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ and an average tidal range of 3.34 m, as a result of the M_2 and S_2 components during spring tides. Based on as many observations as possible from a shipboard ADCP and moored current meters, the method appears to be a promising means for obtaining accurate maps of tidal currents in the Gulf of California.

Key words: Gulf of California, tidal currents and ADCP.

Todo mi agradecimiento

A Dios el Gran Arquitecto del Universo, por poner en mi camino a tantas personas, quienes han contribuido de forma significativa a este trabajo y a mi vida.

A mis padres, Juan Lino y Luisa Pérez, por sembrar en mí la semilla de la sensibilidad y la comprensión, por su cariño, amor y por enseñarme a que debemos tener la fortaleza de continuar hacia adelante no importa las circunstancias que la vida nos presenta.

A mis amigos y hermanos, por siempre darme su apoyo cuando más lo he necesitado.

A esa bella mujer que siempre recuerdo y que guió parte de mi camino, y que como a un Dante Alighieri recorriendo círculos me dieron fortaleza, a ti princesa.

A mi director de tesis Dr. Juan Manuel López, por su calidez, sugerencias y confianza, por ser un gran amigo, además de su apoyo, ayuda y por su enseñanza en todo este proceso.

Al Oceanólogo Joaquín García por su colaboración al facilitar los datos e información utilizados para la realización de esta tesis.

A mi comité de tesis, Dr. Julio Candela, Dr. Silvio Guido Marinone, Dr. Cecilio Rebollar, por todas sus recomendaciones y correcciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo recibido durante mis estudios, así como al proyecto "UMBRALES: Intercambio de Propiedades Físicas y Químicas en el Golfo de California", clave CONACYT G33464-T.

Al personal de biblioteca, administrativos y secretarias del CICESE, por brindarme material de gran utilidad, y por su maravilloso trato humano.

Índice

Página

I. Introducción.	1
II. Datos y metodología. ..	5
II.1. Descripción de los datos.	5
II.1.1. Mediciones de corriente con un ADCP montado en el barco.	5
II.1.2. Mediciones de corriente con ADCP's anclados.	7
II.1.3. Mediciones de la presión subsuperficial.	10
II.1.4. Procesamiento preliminar de los datos.	11
II.2. Técnica implementada.	13
II.2.1. Ajuste por mínimos cuadrados a funciones espaciales y temporales.	13
II.2.2. Análisis Armónico.	17
II.2.3. Ajuste incluyendo condiciones de frontera y datos de anclajes.	18
II.2.4. Ajuste incluyendo constantes armónicas del nivel del mar.	19
III. Resultados.	26
III.1. Ajustes exclusivamente con los perfiles de corriente del ADCP montado en el barco.	28
III.1.1. Ajuste realizado con datos del crucero de marzo de 2002.	32
III.1.2. Ajuste realizado con datos del crucero de mayo de 2003.	36
III.1.3. Ajuste realizado con la combinación de datos de los dos cruceros.	36
III.2. Ajustes con condiciones de frontera.	41
III.3. Ajustes con datos de anclajes.	44
III.4. Ajustes añadiendo constantes armónicas del nivel del mar.	46
III.5. Cálculo del transporte normal a lo largo de diferentes secciones.	54
IV. Discusión.	58
V. Conclusiones.	66
Apéndice A1. Componentes de las elipses de los ajustes a la corriente de marea y comparación con las componentes de los anclajes. .	69
Apéndice A2. Componentes de las elipses de los ajustes al transporte y comparación con las componentes de los anclajes.	73
Referencias.	75

Índice de figuras

Figura		Página
1	Ubicación del Golfo de California y la zona de estudio. Las coordenadas geográficas aproximadas del área de estudio son entre 28° a 30° N y 112° a 114°.....	2
2	Funcionamiento de un ADCP El sonido emitido es reflejado por las partículas en suspensión, la frecuencia se modifica por efecto Doppler y regresa al transductor, obteniéndose así la velocidad. . .	6
3	Trayectoria cubierta por el barco durante los cruceros. (a) Crucero de marzo del 2002 y (b) crucero de mayo del 2003.	7
4	Posición de los anclajes, los sensores de presión y de los lugares donde se cuenta con registros históricos de elevación [Gutiérrez y Morales, 1986]. Delfín (C1), Ballenas (C2), San Esteban (C3) y San Lorenzo (C4). Tiburón (S1), San Esteban (S2), San Lorenzo (S3), San Francisquito (S4), Ballena (S5), Bahía de los Ángeles (D1), Puerto Refugio (D2), Bahía San Luis Gonzaga (D3), Puertecitos (D4) y Roca San Jorge (D5).	8
5	Series de tiempo para las componentes de velocidad rotadas a ejes principales. Los tres primeros pares de series de arriba para abajo corresponden al primer periodo del 2002. Mientras que el par de hasta abajo, corresponde a los datos de 1997. Las corrientes del lado izquierdo son positivas hacia la cabeza del golfo y los del lado derecho son positivos hacia las costas de Sonora.	9
6	Sistema de ecuaciones incluyendo condiciones de frontera y datos del nivel del mar. La matriz se compone básicamente de submatrices A que contienen la base polinomial para que al ser multiplicada por los parámetros, forme las ecuaciones básicas (con los dos primeros renglones) las ecuaciones de flujo normal cero (con el renglón 3) y/o la ecuación de continuidad (con el renglón 4).	22
7	Comparación de las observaciones con el ajuste para (a) la componente u y (b) para la componente v. (c) Gráfica de observaciones vs Ajuste. La parte estacionaria se expandió con un polinomio de grado uno y la parte que involucra a la componente M ₂ con uno de grado dos. Crucero de marzo.	27

Índice de figuras (continuación)

Figura		Página
8	Campo de velocidades (a) observado y (b) ajustado. La aproximación fue hecha con los datos de marzo.	28
9	Campo de corrientes. (a) Marea M_2 . (b) Estacionario. (c) Residuos. Correspondientes al crucero de marzo.	30
10	Contornos de los parámetros de la elipse de marea para la frecuencia M_2 del ajuste básico. (a) Fase (en grados). (b) Semieje mayor (m/s). (c) Orientación (en grados). (d) Semieje menor (m/s). La línea punteada marca la zona donde se concentran los datos. Crucero de marzo.	31
11	Comparación de las observaciones con el ajuste para (a) la componente u y (b) para la componente v. (c) Gráfica de observaciones vs Ajuste. La parte estacionaria se expandió con un polinomio de grado uno y la parte que involucra a la componente M_2 con uno de grado dos. Crucero de mayo.	32
12	Campo de velocidades (a) observado y (b) ajustado. La aproximación fue hecha con los datos de mayo.	33
13	Campo de corrientes. (a) Marea. (b) Estacionario. (c) Residuos. Correspondiente al crucero de mayo.	34
14	Contornos de los parámetros de la elipse de marea para la frecuencia M_2 del ajuste básico. (a) Fase (en grados). (b) semieje mayor (m/s). (c) Orientación (en grados). (d) Semieje menor (m/s). La línea punteada marca la zona donde se concentran las observaciones. Crucero de mayo.	35
15	(a) Gráfica de la magnitud de \bar{v} y su residuo ajustando únicamente la frecuencia M_2 . (b) Gráfica de la magnitud de \bar{v} y su residuo ajustando las frecuencias M_2 , S_2 , K_1 y O_1 . (c) Comparación de los residuos en (a) y (b). Se utilizan datos de los dos cruceros.	37

Índice de figuras (continuación)

Figura		Página
16	Contornos de las componentes de la elipse para la S_2 . (a) Fase (en grados). (b) Semieje menor (m/s). (c) Orientación (en grados). (d) Semieje mayor (m/s). La línea punteada marca la zona donde se concentran las observaciones. Datos de los dos cruceros.	38
17	Comparación de las elipses de marea (frecuencia M_2) en los puntos de los anclajes. (a) Datos de anclajes. (b) Ajuste básico. (c) Igual que (b) pero agregando condiciones de frontera. (d) Con datos de anclajes y condiciones de frontera. (e) Con datos de anclajes. Correspondiente al cálculo hecho con la mezcla de datos de los dos cruceros.	40
18	Comparación de las elipses de marea (frecuencia S_2) en los puntos de los anclajes. (a) Datos de anclajes. (b) Ajuste básico. (c) Con condiciones de frontera. (d) Con datos de anclajes y condiciones de frontera. (e) Con datos de anclajes. Correspondiente al cálculo hecho con la mezcla de datos de los dos cruceros.	42
19	Posiciones de las condiciones de frontera aplicados en la zona de estudio.	43
20	Elipses de marea de la frecuencia M_2 . (a) Ajuste sin condiciones de frontera y (b) con condiciones de frontera.	44
21	Magnitudes de la velocidad. (a) Observaciones. (b) Ajuste con una frecuencia y (c) Ajuste con 4 frecuencias. MR significa que son datos del crucero de marzo, MY crucero de mayo, BA de Ballenas, SE de San Esteban, SL de San Lorenzo, y DE de Delfín. El eje horizontal no tiene correspondencia con el tiempo.	45
22	Amplitudes del semieje mayor para la M_2 en m/s. (a) Con el ajuste básico y (b) con el ajuste agregando datos de correntímetros con condiciones de frontera y frecuencias S_2 y K_1	46

Índice de figuras (continuación)

Figura		Página
23	Fases del semieje mayor para la M_2 en grados. (a) Ajuste básico agregando constantes armónicas y (b) el ajuste de (a) agregando datos de correntímetros con condiciones de frontera y frecuencias S_2 y K_1	47
24	Elipses de transporte (frecuencia M_2) calculadas sobre los anclajes. (a) Datos anclados. (b) Ajuste básico. (c) igual que (b) pero con condiciones de frontera. (d) Con ajuste a la ecuación de continuidad. (e) Con datos de anclajes y ajuste a la ecuación de continuidad. (f) Con ajuste a la elevación mas condiciones de frontera. (g) Con condiciones de frontera y datos de anclajes. Grado polinomial usado para las componentes diurnas K_1 y O_1 , de 1er grado y de 2do para M_2 y S_2	48
25	Mapa de amplitud y fase de elevación de la componente M_2 . . .	53
26	Mapa de amplitud y fase de la elevación de la componente S_2 . . .	54
27	Desfases entre la elevación y la corriente. (a) Con el ajuste básico y (b) con el ajuste agregando condiciones de frontera y datos de anclajes.	55
28	Secciones donde se calculó el transporte.	56
29	Amplitudes y fases del transporte ajustado. (a) Para la sección S1, (b) para la sección S2 y (c) para la sección S3.	61
30	Amplitudes y fases ajustando primero la velocidad y multiplicando por la profundidad local. (a) Para la sección S1, (b) para la sección S2 y (c) para la sección S3.	61

Índice de tablas

I.	Cruceros realizados.	7
II.	Características de los datos de los anclajes.	10
III.	Descripción de las series de tiempo de presión subsuperficial y del nivel del mar.	11
IV.	Ajustes realizados con datos de la velocidad promediada en la vertical.	23
V.	Ajustes realizados con datos de transporte.	24
VI.	Componentes de las elipses de los datos anclados para la M_2 y la S_2	39
VII.	Constantes armónicas de las series de presión subsuperficial y nivel del mar.	50
VIII.	Amplitudes observadas (η_{obs}), modeladas (η_{mod}) y ajustadas (η_{aju}) para la componente M_2 de la elevación.	51
IX.	Fases observadas (ϕ_{obs}), modeladas (ϕ_{mod}) y ajustadas (ϕ_{aju}) para la componente M_2 de la elevación.	51
X.	Amplitudes observadas (η_{obs}), modeladas (η_{mod}) y ajustadas (η_{aju}) para la componente S_2 de la elevación.	52
XI.	Fases observadas (ϕ_{obs}), modeladas (ϕ_{mod}) y ajustadas (ϕ_{aju}) para la componente S_2 de la elevación.	52
XII.	Diferencias de fase entre la elevación y la corriente para la componente M_2	55
XIII.	Amplitudes del transporte, prisma de marea, y amplitud de marea promedio para la componente M_2 y S_2	57
XIV.	Componentes de las elipses de la corriente ajustada.	63
XV.	Tabla de rms para la componente M_2 y S_2 en diferentes ajustes.	65
A1.I.	Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.	69
A1.II.	Comparación de las constantes armónicas ajustadas de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.	70
A1.III.	Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.	71
A1.IV.	Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la S_2 en las coordenadas de los anclajes.	72
A2.I.	Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.	73

I. Introducción

En todas las épocas, el ser humano ha hecho grandes esfuerzos en su afán por descubrir nuevos horizontes que le permitan sacar el mejor provecho del ambiente donde se desenvuelve, una manera en la que lo ha logrado es a través de la navegación en barco. Es en el siglo XVIII cuando el conocimiento se vuelve preciso y las primeras expediciones centran sus objetivos en estudiar la distribución biológica, la composición química y las condiciones físicas en las profundidades de los océanos. En México para desarrollar la investigación marina, Institutos como el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada enfocan algunos de sus estudios en las regiones de gran importancia para el país, uno de ellos es el proyecto UMBRALES que investiga lo que ocurre en la zona de la cual se tratará en este trabajo, que es el Golfo de California. Conocido también como el Mar de Cortés, se encuentra ubicado al noroeste de la República Mexicana (Figura 1), su ancho promedio es de 150 km, mide 1100 km de largo, y la profundidad máxima llega a alcanzar los 3600 m. La oceanografía física es la rama de investigación que nos incumbe, y tiene como meta el estudio del océano para la obtención cuantitativa y descriptiva del carácter de las aguas y de sus movimientos. La cual incluye estudios acerca de la circulación con rasgos de pequeña y mediana escala, de las variaciones de las corrientes costeras, de las corrientes producidas por el viento y por variaciones en la temperatura y la salinidad, así como las producidas por las olas y las mareas. Para estos estudios se requiere de teorías y mediciones precisas para lograr sus objetivos. Para ello el buque oceanográfico Francisco de Ulloa ha recorrido el golfo para apoyar la investigación. En especial el estudio de la variación periódica de las corrientes de marea es el tema central de este trabajo, y permitirá ampliar y desarrollar el conocimiento acerca de la circulación de los mares en nuestro país.

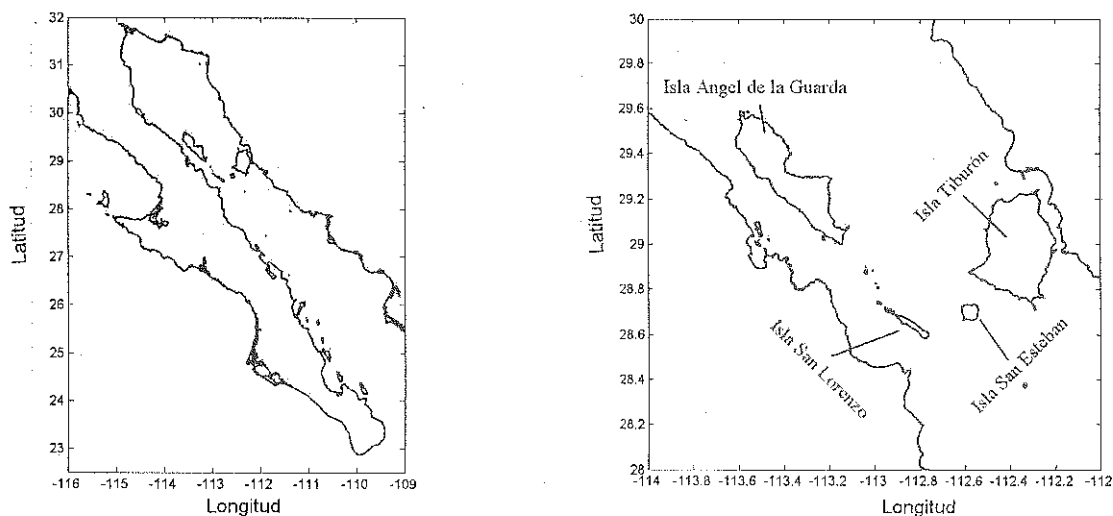


Figura 1: Ubicación del Golfo de California y la zona de estudio. Las coordenadas geográficas aproximadas del área de estudio son entre 28° a 30° N y 112° a 114°.

Se sabe que el origen de las mareas (elevación y corrientes) en nuestro planeta se debe a la dinámica celeste, basada en la Ley de Gravitación Universal de Newton, en especial las interacciones con el Sol y la Luna son las de mayor contribución. La fuerza de marea es inversamente proporcional al cubo de la distancia r ($F_m \sim r^{-3}$) entre los centros de los cuerpos. Además del forzamiento directo de la luna y el sol, la corriente de marea tiende a incrementarse en cuerpos de agua semicerrados, como en algunos ríos, bahías y mares, donde existen corrientes de marea inducidas [Mellor, 1985]. En el caso del golfo, la marea se da principalmente por cooscilación con el Océano Pacífico. La marea en el golfo está afectada también por una combinación de efectos friccionales y de resonancia [Morales y Gutiérrez, 1989]. Para comprender los efectos producidos por la mezcla de las corrientes de marea sobre la distribución de estratificación, así como de la disipación, se cuentan con descripciones obtenidas a partir de observaciones y por modelos numéricos [Argote et al., 1995]. La alta productividad encontrada en el golfo se debe a este tipo de mezcla en la región central del golfo, ya que éste es uno de los principales mecanismos de bombeo de nutrientes a la zona eufótica [Bray, 1988].

En particular este trabajo se concentra en estudiar las corrientes en la zona central del golfo donde se encuentran las islas. La presencia de islas pequeñas como San Lorenzo y San Esteban, entre las que se encuentra un canal de 18.5 km de ancho delimitado por un umbral cuya profundidad máxima es cercana a los 600 m, y la de otras dos islas de gran tamaño, Ángel de la Guarda y Tiburón, donde en sus proximidades existen canales de aproximadamente 23 km y 16.1 km de ancho, respectivamente. En el canal más ancho la profundidad varía de 400 m hasta poco más de 1600 m, y en el más angosto llega casi a los 600 m. Todo esto junto con la batimetría tan accidentada son solo algunas dificultades en la zona central del golfo. Las observaciones son esenciales y han dado evidencia que dentro del area de estudio se producen mareas internas por la corriente de marea en los umbrales [Badan et al., 1991; Filonov y Lavin, 2003] y se ha detectado la existencia de una corriente profunda subinercial semipermanente [Badan, 1998; López y García, 2003].

Otro de los antecedentes más relevantes para esta tesis son los estudios realizados por Badan et al. [1991] y por Salas [1996]. En el primer trabajo se reportan las primeras mediciones de un perfilador acústico de corrientes montado en un barco (ADCP de sus siglas en inglés, Acoustic Doppler Current Profiler) en la región central del Golfo de California. Mientras que en Salas [1996] se hizo un análisis armónico con datos de medidores de corriente fijos en el umbral de Ballenas, en el umbral de San Lorenzo y en el canal de San Esteban. Lo común de dichos trabajos es que usan los datos del ADCP del barco solo para hacer una descripción de las corrientes y transportes durante mareas vivas y muertas, pero no aplican alguna técnica que permita con estas mediciones separar las corrientes de marea de las de baja frecuencia, y de esta forma obtener los parámetros armónicos de las corrientes de marea sobre la trayectoria cubierta en la navegación.

Dentro de los trabajos numéricos que se tienen, están los realizados por Marinone

[1997 y 2000] quien forzó en la frontera abierta con las siete componentes de marea más importantes del golfo y se pudo apreciar que son capaces de inducir corrientes residuales, principalmente por la transferencia de energía de la M_2 y la S_2 que al final es disipada por fricción. Argote et al. [1995] hizo algo similar solo tomando en cuenta la M_2 , ellos afirmaron 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 se presentan fuertes corrientes de marea.

Con un ADCP montado sobre un buque, es posible adquirir mediciones del perfil vertical de la componente horizontal de la velocidad. Una cuestión importante surge cuando se quiere estudiar las corrientes de marea o subinerciales, ya que la pregunta es ¿Se pueden separar los dos tipos de corrientes a partir de las mediciones de un ADCP que cambia frecuentemente de posición? Para solucionar este problema y responder la pregunta, se utiliza la técnica de Candela et al. [1992] implementada en MATLAB, aprovechando también otro tipo de observaciones, como las de corrientes y nivel del mar tomados por instrumentos fijos. Así, el objetivo fundamental de este trabajo es el de realizar una separación de la variabilidad de la corriente de marea y subinercial, así como la de determinar los patrones de corrientes de marea y de las corrientes de baja frecuencia. En el capítulo II se describen los datos con los que se cuentan para nuestro análisis, y se detalla la metodología utilizada para procesarlos. En el capítulo III se exhiben los ajustes más representativos que se validan con la comparación de las observaciones obtenidas con correntímetros anclados. En el capítulo IV se discuten los resultados y en el capítulo final se dan las conclusiones.

II. Datos y metodología

II.1. Descripción de los datos

El conjunto principal de datos utilizados, son los perfiles de corriente obtenidos por un ADCP montado sobre el buque oceanográfico Francisco de Ulloa. Estos se complementan con las series de tiempo de correntímetros y sensores de presión anclados. El ADCP se basa en el uso de ondas acústicas que se dispersan por las partículas milimétricas presentes en el agua (Figura 2). El ADCP emite una señal de sonido en cuatro rayos inclinados, el corrimiento Doppler en la frecuencia del sonido retrodispersado respecto al transmitido, permite conocer la velocidad de la partícula en la dirección del rayo emitido (velocidad radial). Se requieren por lo menos 3 rayos inclinados en la vertical para determinar las 3 componentes de la velocidad del flujo. Los diferentes tiempos de llegada indican que el sonido es reflejado desde diferentes distancias respecto a los transductores, así que un ADCP proporciona la información no sólo sobre la rapidez de la corriente y su dirección en un punto del océano, sino en todo un rango de profundidad; es decir, un ADCP produce un perfil de corriente contra profundidad.

II.1.1. Mediciones de corriente con un ADCP montado en el barco

Una ventaja de los datos de ADCP montado en un barco, es que se puede obtener una gran cantidad de lecturas cubriendo una región amplia, en un tiempo relativamente corto. Los datos que se utilizarán en este trabajo se obtuvieron con un ADCP de 150 kHz que típicamente tiene una resolución vertical de unos 8 m y un alcance vertical de unos 250 m, y el instrumento fue programado para obtener perfiles de corriente

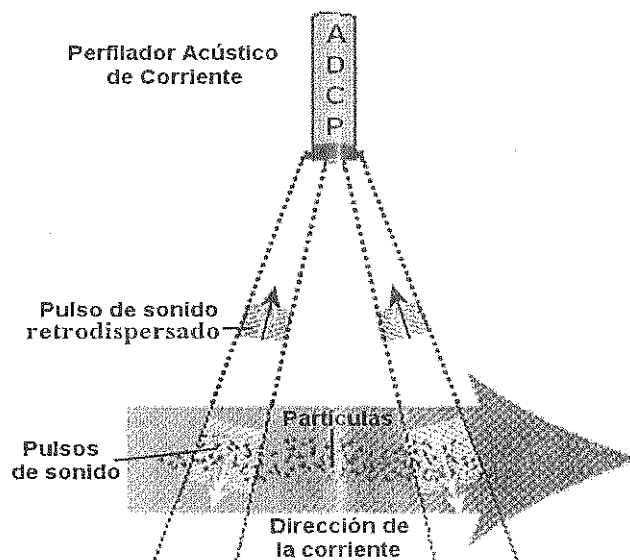


Figura 2: Funcionamiento de un ADCP El sonido emitido es reflejado por las partículas en suspensión, la frecuencia se modifica por efecto Doppler y regresa al transductor, obteniéndose así la velocidad.

promedio cada 5 minutos.

La adquisición de las observaciones por el ADCP montado en el barco está sujeta a ciertas fuentes de error. Los principales factores que afectan la calidad de los datos son: los giros del barco y los cambios de velocidad durante la navegación, la intensidad de las señales acústicas y la homogeneidad de la columna de agua. Finalmente, otras situaciones esporádicas pueden afectar los perfiles de corriente, como la presencia de burbujas de aire o el movimiento no pasivo de organismos [García-Górriz et al., 1997]. Esto, sin embargo, no es razón suficiente para no usar estos instrumentos, ya que posee la ventaja de una gran cobertura espacial, comparada a la de instrumentos anclados que tienen una buena resolución y cobertura temporal, pero una muy limitada cobertura horizontal.

En este trabajo de tesis se usaron los datos obtenidos en 21.6 días en los cruceros

realizados durante marzo de 2002 y mayo de 2003 (Tabla I) en la región central del Mar de Cortés. Los puntos geográficos en los cuales se midió la corriente se muestran en la figura 3.

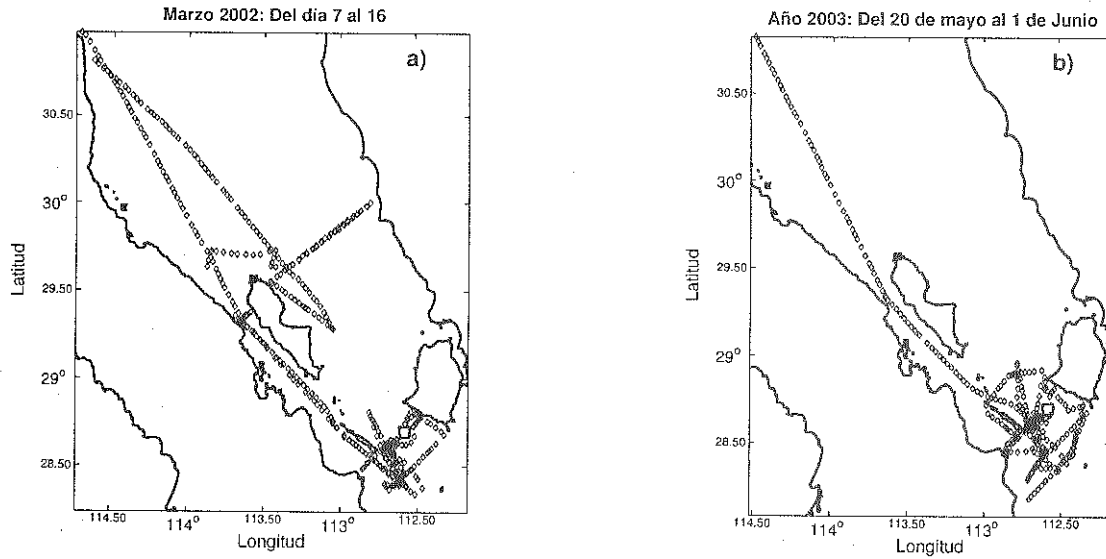


Figura 3: Trayectoria cubierta por el barco durante los cruceros. (a) Crucero de marzo del 2002 y (b) crucero de mayo del 2003.

Tabla I: Cruceros realizados.

Año	Comprendido de:	No de perfiles	Perfiles horarios ya depurados
2002	marzo 7 a marzo 16	2674	204
2003	mayo 20 a junio 1	3383	243

II.1.2. Mediciones de corriente con ADCP's anclados

Como parte del proyecto UMBRALES se han mantenido tres anclajes con perfiladores acústicos en los umbrales de San Esteban, San Lorenzo y parte norte del Canal de Ballenas (Figura 19). Hasta el momento se tienen series de tiempo durante dos periodos; el primero inició en los primeros días de marzo de 2002 finalizando en agosto del mismo año, el segundo periodo está contemplado de agosto 2002 a mayo

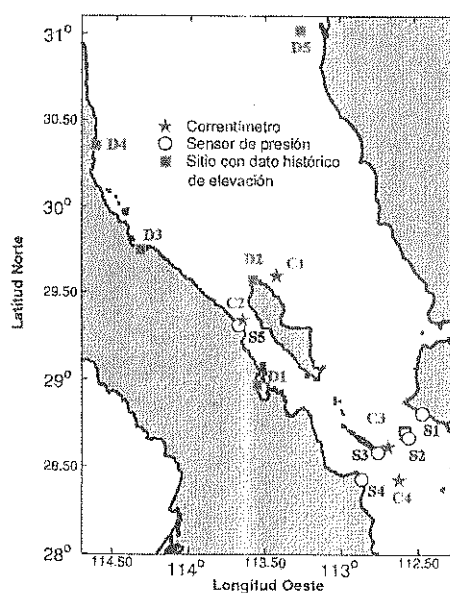


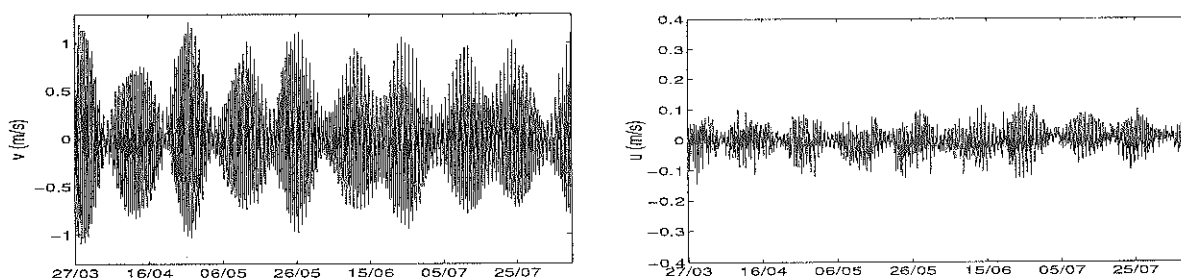
Figura 4: Posición de los anclajes, los sensores de presión y de los lugares donde se cuenta con registros históricos de elevación [Gutiérrez y Morales, 1986]. Delfín (C1), Ballenas (C2), San Esteban (C3) y San Lorenzo (C4). Tiburón (S1), San Esteban (S2), San Lorenzo (S3), San Francisquito (S4), Ballena (S5), Bahía de los Ángeles (D1), Puerto Refugio (D2), Bahía San Luis Gonzaga (D3), Puertecitos (D4) y Roca San Jorge (D5).

de 2003 (Tabla II). La figura 4 muestra la posición donde se anclaron los correntímetros.

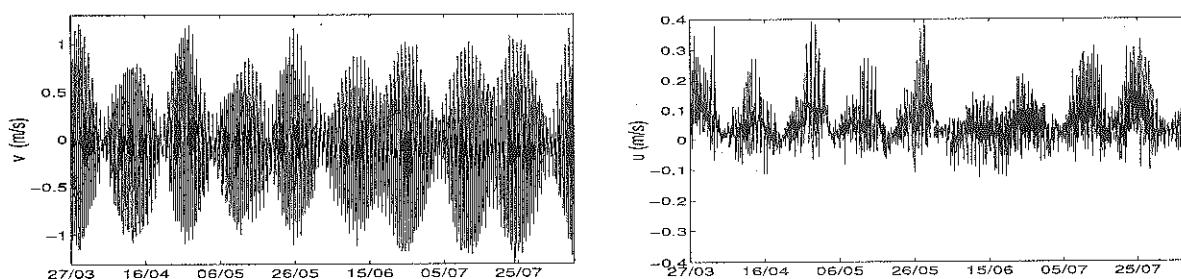
Los correntímetros acústicos anclados permiten obtener con una mejor resolución del comportamiento de la corriente en casi la totalidad de la columna de agua, ya que el perfil en este caso se puede obtener desde cerca del fondo, hasta casi la superficie. Como por ejemplo el anclaje Delfín que en 1997 fue colocado a una profundidad de 280 m (Figura 4), registró perfiles desde los 260 m hasta unos 30 m de la superficie [López y García, 2003].

Los periodos de mareas vivas y muerta pueden ser identificados en los datos horarios de corrientes promediados en la vertical (Figura 5), donde se observa una modulación que se repite aproximadamente cada dos semanas. Las corrientes graficadas a

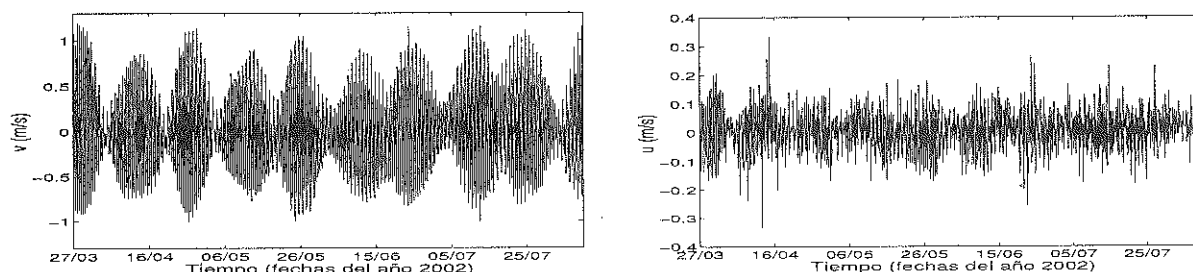
Anclaje Ballenas



Anclaje San Esteban



Anclaje San Lorenzo



Anclaje Delfin

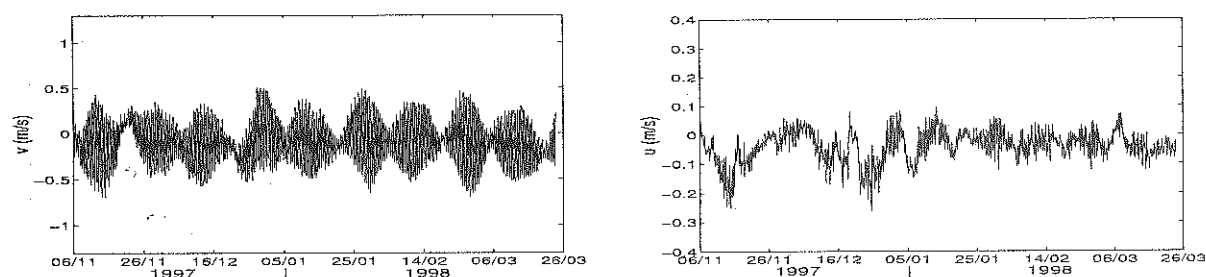


Figura 5: Series de tiempo para las componentes de velocidad rotadas a ejes principales. Los tres primeros pares de series de arriba para abajo corresponden al primer periodo del 2002. Mientras que el par de hasta abajo, corresponde a los datos de 1997. Las corrientes del lado izquierdo son positivas hacia la cabeza del golfo y los del lado derecho son positivos hacia las costas de Sonora.

Tabla II: Características de los datos de los anclajes.

Nombre	NSV	φ	Inicio	Duración	Profundidad local
San Esteban 1	51	142	26/02/02	136.2 días	588.5 m
San Esteban 2	50	141	11/08/02	293.2 días	573.9m
San Lorenzo 1	34	140	26/03/02	137.2 días	388m
San Lorenzo 2	36	141	11/08/02	219.9 días	426.4m
Ballenas 1	57	124	07/03/02	154.9 días	635.3 m
Ballenas 2	51	125	10/08/02	283.5 días	583.6m
Delfín	24	146	6/11/97	137.8 días	283m

Nota. NSV es el número de series en la vertical y φ es el ángulo del eje principal de cada serie medido en grados.

lo largo de los ejes de máxima y mínima varianza (Figura 5) muestran que la corriente menos energética es la del anclaje Delfín alcanzando valores máximos de ~ 0.6 m/s. Las orientaciones del eje de máxima varianza se dan en la tabla II.

II.1.3. Mediciones de la presión subsuperficial

Para monitorear el nivel del mar y otras propiedades dinámicas del Golfo, los sensores de presión son instrumentos importantes que se pueden colocar sobre el lecho marino y medir la presión de la columna de agua sobre él. Si los sensores están instalados en aguas someras (~ 10 m), la presión registrada es una muy buena aproximación al nivel del mar. Los datos se registran y almacenan internamente y son accesibles cuando el sensor se recupera.

Las constantes armónicas de nivel del mar pueden ser calculadas a partir de este tipo de datos. Para ello contamos con cinco series de tiempo, solo un conjunto de datos es de 1997 y las demás son series recientes del año 2002. Los sensores fueron colocados cerca de las islas (Figura 4) y hemos etiquetado a cada uno de ellos con un nombre para poder identificarlos; San Francisquito, San Lorenzo, San Esteban, Tiburón y Ballena. Para fines prácticos del análisis de las cuatro primeras series, se tomará en cuenta el

periodo común que va del 11 de marzo de 2002 al 12 de agosto del mismo año. Por otro lado, existen datos adicionales de elevación de las principales componentes diurnas y semidiurnas sobre estas localizaciones, y de algunas otras a lo largo del golfo (Figura 4). Los reportes se basan en las series de datos de los 70's, y fueron publicados en un informe técnico [Gutiérrez y Morales, 1986]. Para aprovechar mejor esta información, la amplitud y fase de elevación en sitios que son de interés para este estudio, como lo son Bahía de los Angeles, Bahía San Luis Gonzaga, Puerto Refugio y Roca San Jorge se utilizaron en el análisis de los datos y/o en comparar los campos analizados con observaciones.

Tabla III: Descripción de las series de tiempo de presión subsuperficial y del nivel del mar.

Sensor	longitud	latitud	inicio	No de dias
San Fquito	-112.87	28.43	11/02/02	468.96
San Lorenzo	-112.76	28.58	13/02/02	467.67
San Esteban	-112.56	28.67	12/02/02	180.63
Tiburón	-112.47	28.8	11/03/02	441.83
Ballena	-113.67	29.31	12/04/97	375.79
Bahia de los Angeles*	-113.55	28.97	1970	4015
Puerto Refugio*	-113.58	29.58	02/04/97	180
Bahía Sn. Luis Gonzaga*	-114.33	29.75	1970	26
Puertecitos*	-114.63	30.35	1970	20
Roca San Jorge*	-113.26	31.02	1970	24

Nota. (*) Series analizadas por Gutiérrez y Morales [1986].

II.1.4. Procesamiento preliminar de los datos

La calidad de los datos debe ser validada, para esta tarea fue necesario realizar un procesamiento preliminar de los datos. Por ello se realizó una depuración de los datos con ayuda de las rutinas y las herramientas gráficas de CODAS (Common Oceanographic Data Access System) para MATLAB, software desarrollado por la Universidad de Hawaii (<ftp://currents.soest.hawaii.edu/pub/codas3/>).

Básicamente el procesado consistió en los siguientes pasos:

- I) Examinar los datos crudos para asegurarse que el ADCP no tuviera interrupciones considerables, así como la de estimar en que celdas (profundidades) empiezan las lecturas. Una vez extraída esta información fue necesario corregir el perfil grabado cuando el tiempo del reloj interno no coincidía con el tiempo de GPS.
- II) Cargar un banco de datos conveniente para realizar correcciones del perfil, evaluando la calidad de acuerdo a los criterios de diagnóstico.
- III) Revisar los perfiles para eliminar la interferencia del fondo y errores de velocidad debido a la interferencia del CTD.
- IV) Calibrar los datos, rotando cada perfil de acuerdo al ángulo de desviación del transductor respecto a la proa del barco.
- V) Referenciar la velocidad relativa a la tierra, calculando la posición de la embarcación al final de cada perfil y la velocidad media del barco durante la toma de mediciones.

Las consideraciones que se hacen para detectar y eliminar perfiles malos, se basa en los siguientes criterios.

- I) Criterio del buen porcentaje. En algunos casos las señales de regreso al ADCP son pobres, principalmente en malas condiciones del mar. Dado un perfil, éste se elimina si los datos que contiene son menores al 30 por ciento de lo que debe contener si la señal llegara completa.
- II) Criterio de la segunda derivada. La interferencia se puede manifestar por un error grande en celdas particulares, así un valor alto de la segunda derivada para las

componentes de las velocidades necesita ser verificado. Este criterio es muy bueno para detectar “picos” en los perfiles y marcarlos como erróneos.

III) Criterio de la varianza de la velocidad vertical. La varianza es calculada para un perfil entero, cuando esta sobrepasa 4.2×10^3 (mm/s)², el perfil se elimina. Este tipo de errores tiende a ocurrir en lugares poco profundos.

IV) Criterio de la amplitud del sonido. Para quitar algún dato en particular, dado que el eco del fondo afecta la señal acústica, un registro muy grande en la amplitud del sonido se reconoce y se puede quitar. Por ejemplo en los puntos en los cuales el barco se mantiene fijo en agua poca profunda y el ADCP sigue mandando señales.

Como CODAS no se percata de todos los errores y marca perfiles que pudieran estar correctos se hizo una revisión manual para quitar o dejar aquellas componentes que a nuestro juicio estén bien o mal, en este caso se reviso que el perfil o celda sospechoso tuviera el mismo comportamiento al perfil o celda anterior y posterior.

II.2. Técnica implementada

II.2.1. Ajuste por mínimos cuadrados a funciones espaciales y temporales

Para analizar las corrientes se utilizó la técnica de Candela et al. [1992] que permite separar corrientes de marea y de baja frecuencia. Este método se describe a continuación. El campo de velocidades para cada profundidad es:

$$u(x, y, t) = u_{est}(x, y) + u_{mar}(x, y, t) . \quad (1)$$

En la parte estacionaria (u_{est}) de la expresión (1) se encuentra la parte subinercial que se supone independiente del tiempo durante la duración de muestreo. La parte dependiente del tiempo contiene a la marea y puede ser representada como una suma

de funciones senoidales dependiente del tiempo, y de frecuencias fijas de marea. La dependencia espacial en el segundo término de (1) entra en las amplitudes a_i y fases φ_i de las funciones senoidales, es decir,

$$\begin{aligned}
 u_{mar}(x, y, t) &= \sum_{i=1}^N a_i(x, y) \cos[\omega_i t - \varphi_i(x, y)] \\
 &= \sum_{i=1}^N a_i(x, y) \cos \varphi_i \cos(\omega_i t) + \sum_{i=1}^N a_i(x, y) \sen \varphi_i \sen(\omega_i t) \\
 &= \sum_{i=1}^N b_i(x, y) \cos(\omega_i t) + \sum_{i=1}^N c_i(x, y) \sen(\omega_i t) ,
 \end{aligned} \tag{2}$$

donde:

$$b_i = a_i \cos \varphi_i ,$$

$$c_i = a_i \sen \varphi_i ,$$

$$a_i = (b_i + c_i)^{1/2} ,$$

$$\tan \varphi_i = \frac{c_i}{b_i} ,$$

y N es el número de frecuencias de marea (ω_i) a considerar. La diferencia y la ventaja con respecto a un análisis armónico convencional es que en este caso b_i , c_i y u_{est} varían espacialmente, y para nuestro propósito empezamos suponiendo que los podemos aproximar por medio de una función polinomial de la siguiente forma

$$b_i = \sum_{j=0}^{DP} \sum_{k=0}^j \alpha_{j-k,k} x^{j-k} y^k \tag{3}$$

con expresiones similares para c_i y u_{est} . En (3) DP es el grado del polinomio, y $\alpha_{j-k,k}$

son los coeficientes del polinomio que se obtienen de un ajuste por cuadrados mínimos a las observaciones. Así entonces, la expresión (1) queda como:

$$u(x, y, t) = \sum_{j=0}^{DP_{est}} \sum_{k=0}^j \alpha_{(est)j-k,k} x^{j-k} y^k + \dots \quad (4)$$

$$\dots + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{DP_i} \sum_{k=0}^j [\alpha_{j-k,k}^{(i)} \cos(\omega_i t) + \gamma_{j-k,k}^{(i)} \text{sen}(\omega_i t)] x^{j-k} y^k.$$

Esta última expresión se puede reescribir como:

$$u(x, y, t; \alpha_{(est)j-k,k}, \alpha_{j-k,k}^{(i)}, \gamma_{j-k,k}^{(i)}) = u_{est}(x, y; \alpha_{(est)j-k,k}) + u_{mar}(x, y; \alpha_{j-k,k}^{(i)}, \gamma_{j-k,k}^{(i)}) \quad (5)$$

La cantidad de parámetros $\alpha_{(est)j-k,k}$, $\alpha_{j-k,k}^{(i)}$ y $\gamma_{j-k,k}^{(i)}$ depende del grado del polinomio y está dada por $(DP+2)(DP+1)/2$ para cada componente estacionaria y de marea. Para separar la variabilidad de la marea a partir de las observaciones de corriente se requiere que la suma de los errores residuales sea mínimo. Aplicamos el modelo (5) a nuestras observaciones y podemos escribir

$$u(x_l, y_l, t_l; \alpha_{(est)j-k,k}, \alpha_{j-k,k}^{(i)}, \gamma_{j-k,k}^{(i)}) = u_{obs}(x_l, y_l, t_l) + \xi_u \quad (6)$$

para $l=1, \dots, m$ observaciones y NP parámetros del modelo (coeficientes de los polinomios). En (6), ξ_u representa el residuo del ajuste del modelo a las observaciones. Una ecuación similar se tiene para la componente v de velocidad. Juntando ambas componentes esto equivale a formar un sistema de ecuaciones:

$$Ac = d \quad (7)$$

donde A es una matriz de $2m \times NP$ y d es un vector de $2m \times 1$ que contiene las observaciones de u y v . En general $2m \gg NP$ y (7) es un sistema sobredeterminado de

ecuaciones lineales. La solución de (7) es aquella que minimiza la suma de los cuadrados de las desviaciones entre el modelo y las observaciones, lo cual resulta equivalente al método de mínimos cuadrados. En la práctica el sistema se resuelve por el método de descomposición en valores singulares (SVD).

Cuando se resuelven las ecuaciones lineales debe tomarse en cuenta el número de condición de la matriz A , que está dado por la relación del valor singular más grande al más pequeño ($\varphi_{max}/\varphi_{min}$), e indica que tan linealmente independientes son las columnas de la matriz A . Esto a su vez es una medida de que tanto la solución es afectada por pequeñas variaciones en los valores de A . Se probaron diferentes combinaciones en los grados de los polinomios considerando las frecuencias M_2 , S_2 , K_1 y O_1 (Tablas IV y V). Para ejemplificar mejor el método supongamos que la parte estacionaria es expandida con un polinomio de grado uno y la parte que involucra a la frecuencia M_2 con uno de grado dos. La estructura de la matriz A se compone de las submatrices:

$$A_{est} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_m & y_m \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$A_{CM_2} = \begin{pmatrix} \cos w_1 t_1 & x_1 \cos w_1 t_1 & y_1 \cos w_1 t_1 & x_1^2 \cos w_1 t_1 & x_1 y_1 \cos w_1 t_1 & y_1^2 \cos w_1 t_1 \\ \cos w_1 t_2 & x_2 \cos w_1 t_2 & y_2 \cos w_1 t_2 & x_2^2 \cos w_1 t_2 & x_2 y_2 \cos w_1 t_2 & y_2^2 \cos w_1 t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos w_1 t_m & x_m \cos w_1 t_m & y_m \cos w_1 t_m & x_m^2 \cos w_1 t_m & x_m y_m \cos w_1 t_m & y_m^2 \cos w_1 t_m \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$A_{SM2} = \begin{pmatrix} \text{sen } w_1 t_1 & x_1 \text{ sen } w_1 t_1 & y_1 \text{ sen } w_1 t_1 & x_1^2 \text{ sen } w_1 t_1 & x_1 y_1 \text{ sen } w_1 t_1 & y_1^2 \text{ sen } w_1 t_1 \\ \text{sen } w_1 t_2 & x_2 \text{ sen } w_1 t_2 & y_2 \text{ sen } w_1 t_2 & x_2^2 \text{ sen } w_1 t_2 & x_2 y_2 \text{ sen } w_1 t_2 & y_2^2 \text{ sen } w_1 t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{sen } w_1 t_m & x_m \text{ sen } w_1 t_m & y_m \text{ sen } w_1 t_m & x_m^2 \text{ sen } w_1 t_m & x_m y_m \text{ sen } w_1 t_m & y_m^2 \text{ sen } w_1 t_m \end{pmatrix} \quad (10)$$

y definiendo

$$A_{vel} = (A_{est} \quad A_{CM2} \quad A_{SM2}), \quad (11)$$

A se ordena de la siguiente manera:

$$A = \begin{pmatrix} A_{vel} & A_0 \\ A_0 & A_{vel} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

A_{vel} es de $m \times NP/2$ o en este ejemplo específico de $m \times 15$ y A_0 es una matriz de ceros de $m \times NP/2$ ($m \times 15$ en este ejemplo). En todos los casos presentados en este trabajo se consideraron polinomios de grado (≤ 2) para así mantener el número de condición $< 1 \times 10^{-4}$, tal y como recomienda Candela et al. [1992]. Así mismo, se considera el coeficiente de correlación como una medida de la varianza explicada por el ajuste. Finalmente también se considera el criterio de Rayleigh para determinar que constantes armónicas pueden separarse [Godín, 1988].

II.2.2. Análisis Armónico

La corriente de marea es el movimiento oscilatorio horizontal del agua asociado con el aumento o disminución del nivel del mar por las mareas en respuesta a las fuerzas que la generan. Este tipo de observaciones vectoriales son semejantes a las del nivel del mar, en el sentido de que pueden ser representadas por una descomposición de armónicos, y así mediante un ajuste de mínimos cuadrados encontrar su amplitud y fase. Este método fue aplicado a las series de tiempo de los anclajes y sensores de

presión. La diferencia con la técnica anterior es que la amplitud y fase se consideran estrictamente como constantes y se aplica a una sola serie de tiempo observada en una misma localidad.

II.2.3. Ajuste incluyendo condiciones de frontera y datos de anclajes

Si bien las mediciones de ADCP del barco reflejan lo que ocurre en determinados puntos geográficos, existen zonas en las cuales no fue posible adquirirlas, sobre todo cerca de las costas. Por lo tanto resultan poco creíbles los cálculos para obtener la corriente de marea en estos lugares a partir del esquema utilizado y explicado en la sección II.2.1. Para tomar en cuenta la presencia de costas se utilizó una condición de frontera donde la componente de la corriente normal a lo largo de la costa sea cero [Carrillo et al., 2004]. Se incorporará esta condición en el sistema de ecuaciones imponiendo $\vec{u} \cdot \hat{n} = 0$ en algunos puntos a lo largo de las costas, donde \vec{u} es el vector de la corriente de marea y \hat{n} es el vector unitario normal a la costa. Por lo tanto, si ψ es la orientación de \hat{n} , entonces $\hat{n} = (\cos\psi, \sin\psi)$ y la condición se convierte en $(u\cos\psi + v\sin\psi) = 0$. Si \hat{n} apunta hacia la izquierda $\psi = 215^\circ$, o si \hat{n} apunta hacia la derecha $\psi = 35^\circ$, que es la orientación media del golfo y de muchas de las costas de las islas (v. g., Isla San Lorenzo y Ángel de la Guarda) más menos 90° . Solo en algunos puntos la orientación es diferente como en la isla Tiburón (Figura 19).

En cada punto de la costa donde se van a incorporar las condiciones de frontera, se evaluará la ecuación $u\cos\psi + v\sin\psi = 0$ durante un ciclo de marea (durante 13 hrs para la M2, por ejemplo). Prosiguiendo con el mismo caso de la sección II.2.1 por cada evaluación de la ecuación $u\cos\psi + v\sin\psi = 0$ se debe agregar una ecuación al sistema $Ac = d$ que es de la forma,

$$\begin{aligned}
& \left\{ \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^l (\alpha_{uest})_{j-k,k} x^{j-k} y^k + \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^j [(\alpha_{UM2})_{j-k,j} \cos \omega t + \dots \right. \\
& + \dots (\gamma_{UM2})_{j-k,k} \sin \omega t] x^{j-k} y^k \left. \right\} \cos \psi + \left\{ \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^l (\alpha_{vest})_{j-k,k} x^{j-k} y^k + \dots \right. \\
& \left. + \dots \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^j [(\alpha_{VM2})_{j-k,j} \cos \omega t + (\gamma_{VM2})_{j-k,k} \sin \omega t] x^{j-k} y^k \right\} \sin \psi = 0
\end{aligned} \tag{13}$$

donde α_{uest} y α_{vest} son los coeficientes de la parte estacionaria de u y v respectivamente; y α_{UM2} , γ_{UM2} , α_{VM2} y γ_{VM2} son los correspondientes coeficientes para la componente M2, también para u y v respectivamente. Notese que este procedimiento aumenta el número de “datos” (puntos donde se escoge aplicar las condiciones de frontera) pero no el número de parámetros. Además el método únicamente anula la componente normal de la velocidad en los puntos de la costa, pero deja que el ajuste por mínimos cuadrados determine la componente tangencial en los puntos escogidos.

II.2.4. Ajuste incluyendo constantes armónicas del nivel del mar

También es posible incluir constantes armónicas del nivel del mar en el ajuste de Candela et al. [1992]. Para ello se utiliza la versión integrada verticalmente de la ecuación de continuidad,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \tag{14}$$

donde η es el nivel del mar y U y V son los transportes en las direcciones x y y respectivamente. Para un movimiento armónico como la marea y representando a los transportes como,

$$U = b_u(x, y) \cos \omega t + c_u(x, y) \sin \omega t$$

y similarmente para V, podemos escribir (14) como,

$$\left(\frac{\partial b_u}{\partial x} + \frac{\partial b_v}{\partial y}\right) \cos \omega t + \left(\frac{\partial c_u}{\partial x} + \frac{\partial c_v}{\partial y}\right) \sin \omega t = \eta_0 \omega (\cos \phi_\eta \sin \omega t - \sin \phi_\eta \cos \omega t) \quad (15)$$

donde $\eta_0(x, y)$ y ϕ_η es la amplitud y fase del nivel del mar (conocidas) en los puntos donde se tenga esta información; y b_u , c_u , b_v y c_v , representan los polinomios que ajustan la amplitud y fase del transporte para las componentes U y V (ver ec. 3), respectivamente. Notese que este tipo de ajuste solo se puede realizar cuando se utiliza el transporte, pero no la velocidad.

Para incorporar la ec. (15), se sustituyen las expresiones para b_u , b_v , c_u y c_v utilizando la ecuación (3). Una vez que se derivan los polinomios, la ecuación resultante se incorpora a la matriz A que aparece en (7), mientras que el lado derecho de (15) se incorpora al vector d que aparece en (7). Al igual que en el caso de las condiciones de frontera, este procedimiento aumentó el número de datos (renglones de A) pero no el número de parámetros del modelo.

Finalmente la estructura final del sistema de ecuaciones para nuestro ejemplo, ya con condiciones de frontera y constantes armónicas, es como la que se muestra en la figura 6. Los dos primeros renglones del arreglo es la matriz de la ecuación (12). El tercer renglón corresponde a la matriz que contiene información de los puntos que se eligieron para poner condiciones de frontera evaluadas en cada polinomio, de manera similar las submatrices A con subíndice inicial F son similares a las de las ecuaciones (8

a 10) que se multiplican por un escalar que depende de la orientación de la normal a la costa, obsérvese que al hacer el producto de este renglón con el vector que contiene los parámetros, las ecuaciones resultantes se igualan a cero. Siguiendo con el ejemplo de la sección II.2.1, la submatriz A_{Fest} es de $nf \times 3$ mientras que el resto de las matrices del tercer renglón son de $nf \times 6$, donde nf es el número de puntos espaciales donde se aplican las condiciones de frontera, multiplicado por el número de horas utilizadas para evaluar las condiciones de frontera. El cuarto renglón corresponde a la matriz que al ser multiplicada por los parámetros ajusta la elevación, η_{cs} y η_{sc} son los términos que aparecen del lado derecho de la igualdad en la ecuación (15). En el último renglón las matrices que son derivadas de los polinomios son de $na \times 6$, donde na es el número de puntos con constantes armónicas de la elevación multiplicado por el número de horas utilizadas para evaluar la ecuación (15).

$$\begin{pmatrix}
 A_{\text{ext}} & A_{\text{CM}2} & A_{\text{SM}2} & 0_{\text{mx}3} & 0_{\text{mx}6} & 0_{\text{mx}6} \\
 0_{\text{mx}3} & 0_{\text{mx}6} & 0_{\text{mx}6} & A_{\text{ext}} & A_{\text{CM}2} & A_{\text{SM}2} \\
 A_{\text{Fext}} \cos \psi & A_{\text{FCM}2} \cos \psi & A_{\text{FSM}2} \cos \psi & A_{\text{Fext}} \sin \psi & A_{\text{FCM}2} \sin \psi & A_{\text{FSM}2} \sin \psi \\
 0_{\text{mx}3} & \frac{\partial A_{\text{ACM}2}}{\partial x} & \frac{\partial A_{\text{ASM}2}}{\partial x} & 0_{\text{mx}3} & \frac{\partial A_{\text{ACM}2}}{\partial y} & \frac{\partial A_{\text{ASM}2}}{\partial y}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \alpha_{\text{Uext}} \\
 \gamma_{\text{UCM}2} \\
 \gamma_{\text{USM}2} \\
 \alpha_{\text{Vext}} \\
 \gamma_{\text{VCM}2} \\
 \gamma_{\text{VSM}2}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 U_{\text{obs}} \\
 V_{\text{obs}} \\
 0_{\text{mf}} \\
 \eta_{\text{CS}} - \eta_{\text{SC}}
 \end{pmatrix}$$

Figura 6: Sistema de ecuaciones incluyendo condiciones de frontera y datos del nivel del mar. La matriz se compone básicamente de submatrices A que contienen la base polinomial para que al ser multiplicada por los parámetros, forme las ecuaciones básicas (con los dos primeros renglones) las ecuaciones de flujo normal cero (con el renglón 3) y/o la ecuación de continuidad (con el renglón 4).

Tabla IV: Ajustes realizados con datos de la velocidad promediada en la vertical.

Ajustes realizados con los datos de marzo 2002								
Dest	DM ₂	DK ₁		CF	D.Anc.	Cor.	Cond. A	
1	1					0.79	95.6	
2	1					0.82	4.26x10 ³	
2	2					0.85	9.09x10 ³	
1	3					0.86	6.56x10 ⁷	
3	1					0.85	2.84x10 ⁵	
1	2	1				0.8	9.80x10 ³	
1	2	2				0.83	1.42x10 ⁴	
1	2					0.83	8.90x10 ³	
1	2				MM	0.78	1.67x10 ⁴	
1	2				MV	0.76	1.67x10 ⁴	
1	2			X		0.80	2.04x10 ³	
1	2			X	MM	0.77	4.50x10 ³	
1	2			X	MV	0.76	4.50x10 ³	
Ajustes realizados con los datos de mayo 2003								
Dest	DM ₂	DK ₁		CF	D.Anc.	Cor.	Cond. A	
1	1					0.72	199.89	
2	1					0.74	9.64x10 ⁰³	
2	2					0.78	2.14x10 ⁰⁴	
1	3					0.77	1.71x10 ⁰⁶	
3	1					0.76	1.04x10 ⁰⁶	
1	2	1				0.79	1.46x10 ³	
1	2	2				0.78	3.11x10 ⁴	
1	2					0.78	1.39x10 ⁴	
1	2				MM	0.78	2.88x10 ⁴	
1	2				MV	0.76	2.88x10 ⁴	
1	2			X		0.75	2.93x10 ³	
1	2			X	MM	0.77	4.64x10 ³	
1	2			X	MV	0.75	4.64x10 ³	
Ajustes realizados con los datos de marzo y mayo								
Dest	DM ₂	DS ₂	DK ₁	DO ₁	CF	D.Anc.	Cor.	Cond. A
1	2	2	2	2			0.84	1.97x10 ⁴
1	2						0.78	9.10x10 ³
1	2					MM	0.76	1.51x10
1	2					MV	0.75	1.51x10 ⁴
1	2				X		0.76	2.83x10 ³
1	2				X	MM	0.76	4.73x10 ³
1	2				X	MV	0.75	4.73x10 ³
1	2	2	1	1			0.85	1.49x10 ⁴
1	2	2	1	1		MM	0.91	2.33x10 ⁴
1	2	2	1	1		MV	0.92	2.33x10 ⁴
1	2	2	1	1	CF		0.80	3.71x10 ³
1	2	2	1	1	CF	MM	0.89	3.28x10 ³
1	2	2	1	1	CF	MV	0.90	3.28x10 ³
1	2	2	1				0.84	1.36x10 ⁴
1	2	2	1			MM	0.91	2.31x10 ⁴
1	2	2	1			MV	0.92	2.31x10 ⁴
1	2	2	1		CF		0.79	3.59x10 ³
1	2	2	1		CF	MM	0.89	3.01x10 ³
1	2	2	1		CF	MV	0.90	3.01x10 ³

Nota. La columna Dest contiene el grado del polinomio usado para el término estacionario. Las columnas DM₂, DS₂, DK₁, DO₁ son los grados de los polinomios que se utilizaron para cada frecuencia. CF indica condiciones de frontera, MM significa que se usaron datos de anclajes (D. Anc.) que inician en marea muerta, y MV que comienzan en marea viva. Cor. es la correlación y Cond. A el número de condición de la matriz A.

Tabla V: Ajustes realizados con datos de transporte.

Con los datos de marzo							
Dest	DM ₂	DK ₁	CF	D.Anc.	Ec. Cont.	Cor.	Cond. A
1	1					0.76	95.6
2	1					0.79	4.29x10 ³
2	2					0.8	9.10x10 ³
1	3					0.81	8.59x10 ⁵
3	1					0.81	2.84x10 ⁵
1	2	1				0.8	9.82x10 ³
1	2	2				0.83	1.42x10 ⁴
1	2					0.78	9.00x10 ³
1	2				X	0.79	8.68x10 ³
1	2			MM		0.77	1.67x10 ⁴
1	2			MM	X	0.77	1.63x10 ⁴
1	2			MV		0.75	1.67x10 ⁴
1	2			MV	X	0.75	1.63x10 ⁴
1	2		X			0.76	2.04x10 ³
1	2		X	X		0.77	6.74x10 ²
1	2		X	MM		0.76	4.50x10 ³
1	2		X	MM	X	0.75	1.44x10 ³
1	2		X	MV		0.74	4.50x10 ³
1	2		X	MV	X	0.74	1.44x10 ³
Con los datos de mayo							
Dest	DM ₂	DK ₁	CF	D.Anc.	Ec. Cont.	Cor.	Cond. A
1	1					0.73	199.89
2	1					0.76	9.64x10 ³
2	2					0.78	2.14x10 ⁴
1	3					0.81	1.71x10 ⁶
3	1					0.77	1.04x10 ⁶
1	2	1				0.79	1.46x10 ⁴
1	2	2				0.82	3.11x10 ⁴
1	2					0.78	1.39x10 ⁴
1	2				X	0.77	1.36x10 ⁴
1	2			MM		0.78	2.88x10 ⁴
1	2			MM	X	0.78	2.21x10 ⁴
1	2			MV		0.75	2.88x10 ⁴
1	2			MV	X	0.76	2.21x10 ⁴
1	2		X			0.72	2.93x10 ³
1	2		X		X	0.73	9.29x10 ²
1	2		X	MM		0.76	4.64x10 ³
1	2		X	MM	X	0.75	1.73x10 ³
1	2		X	MV		0.75	4.64x10 ³
1	2		X	MV	X	0.74	1.73x10 ³

Nota. La columna Dest contiene el grado del polinomio usado para el término estacionario. Las columnas DM₂, DS₂, DK₁, DO₁ son los grados de los polinomios que se utilizaron para cada frecuencia. CF indica condiciones de frontera, MM significa que se usaron datos de anclajes (D. Anc.) que inician en marea muerta, y MV en marea viva. Ec. Cont. se usa para indicar si se ajustó la ecuación de continuidad, Cor. es la correlación y Cond. A. el número de condición de la matriz A.

Continuación de la tabla V.

Con los datos de marzo y mayo									
Dest	DM ₂	DS ₂	DK ₁	DO ₁	CF	D.Anc.	Ec. Cont.	Cor.	Cond. A
1	2							0.74	9.10x10 ³
1	2						X	0.75	9.00x10 ³
1	2					MM		0.76	1.51x10 ⁴
1	2					MM	X	0.76	1.46x10 ⁴
1	2					MV		0.74	1.51x10 ⁴
1	2					MV	X	0.74	1.46x10 ⁴
1	2				X			0.73	2.83x10 ³
1	2				X		X	0.73	8.90x10 ²
1	2				X	MM		0.75	4.73x10 ³
1	2				X	MM	X	0.74	1.43x10 ³
1	2				X	MV		0.74	4.73x10 ³
1	2				X	MV	X	0.73	1.43x10 ³
1	2	2	1	1				0.83	1.49x10 ⁴
1	2	2	1	1			X	0.83	1.46x10 ⁴
1	2	2	1	1		MM		0.91	2.33x10 ⁴
1	2	2	1	1		MM	X	0.91	2.24x10 ⁴
1	2	2	1	1		MV		0.92	2.33x10 ⁴
1	2	2	1	1		MV	X	0.91	2.24x10 ⁴
1	2	2	1	1	X			0.79	3.72x10 ³
1	2	2	1	1	X		X	0.79	1.24x10 ³
1	2	2	1	1	X	MM		0.88	3.29x10 ³
1	2	2	1	1	X	MM	X	0.88	1.31x10 ³
1	2	2	1	1	X	MV		0.90	3.28x10 ³
1	2	2	1	1	X	MV	X	0.89	1.30x10 ³
1	2	2	1					0.82	1.37x10 ⁴
1	2	2	1				X	0.82	1.36x10 ⁴
1	2	2	1			MM		0.91	2.31x10 ⁴
1	2	2	1			MM	X	0.90	2.22x10 ⁴
1	2	2	1			MV		0.92	2.32x10 ⁴
1	2	2	1			MV	X	0.91	2.23x10 ⁴
1	2	2	1		X			0.78	3.59x10 ³
1	2	2	1		X		X	0.79	1.20x10 ³
1	2	2	1		X	MM		0.88	3.02x10 ³
1	2	2	1		X	MM	X	0.87	1.20x10 ³
1	2	2	1		X	MV		0.90	3.01x10 ³
1	2	2	1		X	MV	X	0.89	1.20x10 ³

Nota. La columna Dest contiene el grado del polinomio usado para el término estacionario. Las columnas DM₂, DS₂, DK₁, DO₁ son los grados de los polinomios que se utilizaron para cada frecuencia. CF indica condiciones de frontera, MM significa que se usaron datos de anclajes (D. Anc.) que inician en marea muerta, y MV en marea viva. Ec. Cont. se usa para indicar si se ajustó la ecuación de continuidad, Cor. es la correlación y Cond. A. el número de condición de la matriz A.

III. Resultados

En este capítulo se presentan los campos de velocidad estacionario y de las componentes de marea diurna y semidiurna que se obtuvieron aplicando el método desarrollado por Candela et al. [1992]. En todas las aplicaciones se ajustó la componente de marea M_2 y en diferentes ajustes también se incluyeron las componentes K_1 , S_2 y O_1 . Las dos últimas componentes se incluyeron solamente cuando se hizo el ajuste de los datos de los dos cruceros, de tal manera que de acuerdo al criterio de Rayleigh [Godín, 1998], el periodo temporal permitiera separar estas dos componentes. Al igual que en el análisis armónico tradicional, los datos de corrientes medidos con el ADCP de barco se redujeron a promedios horarios.

Siendo la frecuencia M_2 la componente de marea más energética en el Golfo de California [García-Silva y Marinone, 2000] y la que genera corrientes de gran magnitud en la zona de las islas [Badan-Dangon et al., 1991], varios estudios le han dado más importancia. Además de esto y por la corta duración de la serie de ADCP del barco, el énfasis de este trabajo también será sobre la componente M_2 .

En las tablas IV y V se muestran todos los ajustes que se hicieron a los datos de velocidad promediada verticalmente y al transporte, respectivamente. En cada tabla se muestran todos los ajustes considerados variando los grados de los polinomios de la componente estacionaria y de las componentes de marea. Asimismo, se muestran diferentes combinaciones de los casos en que se incluyen diferentes componentes de marea, condiciones de frontera, datos de corrientes de instrumentos anclados, y constantes armónicas del nivel del mar, tanto para los ajustes de velocidad promedio como para los de transporte. Los coeficientes de correlación son relativamente altos y

el número de condición se eleva si se aumenta el orden del polinomio. El ajuste a la velocidad es mejor que al transporte, ya que como se verá más adelante, la comparación con observaciones es más satisfactoria.

A continuación, en la sección III.I se presentan los ajustes básicos a los datos del ADCP del barco exclusivamente, tanto a los datos de los dos cruceros por separado, como al conjunto de ambos cruceros. En la sección III.2 se presentan los ajustes que incluyeron también las condiciones de frontera donde el flujo normal a la costa se anula. En la sección III.3 se presentan los ajustes que se incluyen datos de corriente de los anclajes. Finalmente, en la sección III.4 se presentan ajustes que incluyen constantes armónicas del nivel del mar.

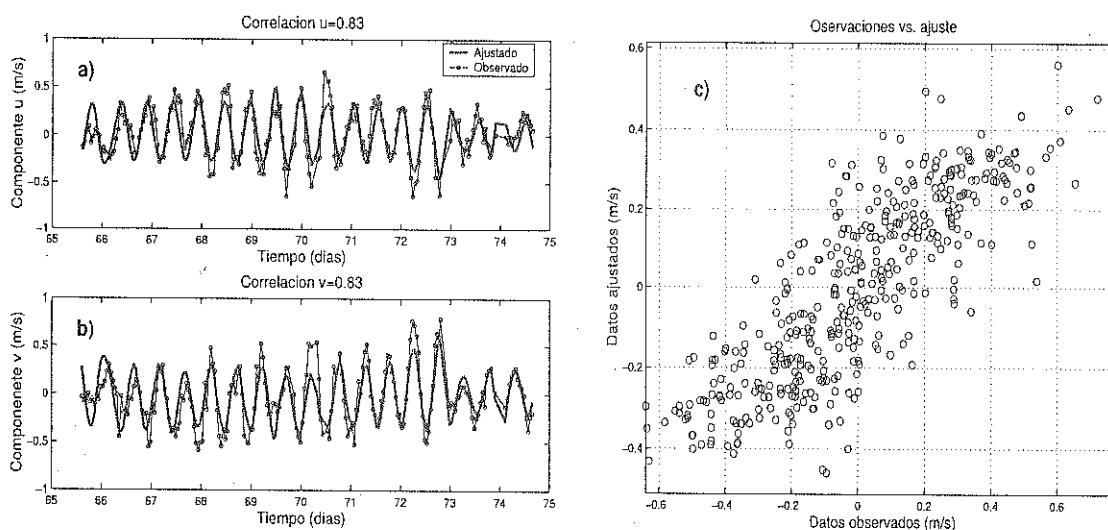


Figura 7: Comparación de las observaciones con el ajuste para (a) la componente u y (b) para la componente v. (c) Gráfica de observaciones vs Ajuste. La parte estacionaria se expandió con un polinomio de grado uno y la parte que involucra a la componente M_2 con uno de grado dos. Crucero de marzo.

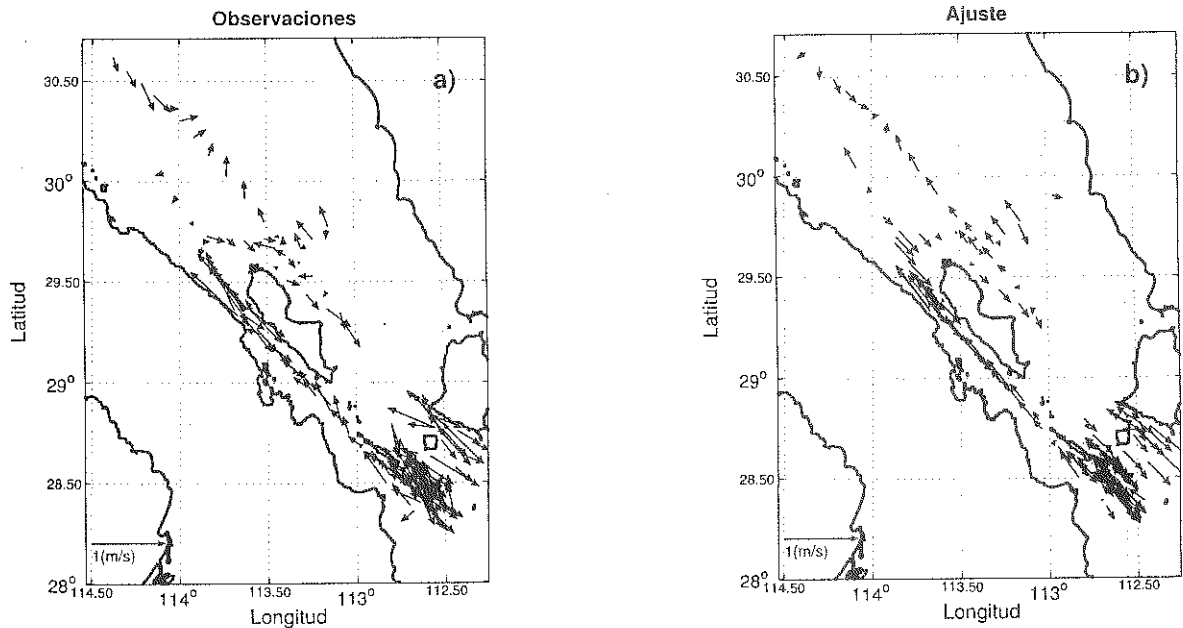


Figura 8: Campo de velocidades (a) observado y (b) ajustado. La aproximación fue hecha con los datos de marzo.

III.1. Ajustes exclusivamente con los perfiles de corriente del ADCP montado en el barco

III.1.1. Ajuste realizado con datos del crucero de marzo de 2002

Para mostrar el funcionamiento básico que tiene el método, en la figura 7 se muestran gráficas comparativas de las observaciones con el ajuste de la velocidad expandida con polinomios de grado uno para el término estacionario y de grado dos para la componente M_2 de la marea. En la figura 7c se observa como la distribución de las componentes u y v observadas y calculadas mantienen una alta correlación entre ellas, que es de 0.83. El campo de velocidades observado (Figura 8a) muestra flujos con componentes perpendiculares al golfo, mientras que en el ajuste (Figura 8b) las corrientes tienden a ser más paralelas al golfo. Esto podría ser una consecuencia de que el método esté ayudando a eliminar errores de medición que pudieran estar todavía

presentes. La máxima corriente registrada de 0.71 m/s se localiza en la parte norte del canal de Ballenas, es decir entre la Isla Angel de la Guarda y la costa de Baja California. Esta zona permite un flujo mayor debido a que es un canal muy estrecho, el ajuste también refleja una corriente máxima en esta zona.

La parte semidiurna de la corriente modelada (Figura 9a) está orientada prácticamente de forma paralela al Golfo, las menores magnitudes se localizaron entre las Islas Angel de la Guarda y San Lorenzo, y al este y noreste de la isla Angel de la Guarda. El método arrojó residuos grandes en algunas áreas (Figura 9c), lo cual podría deberse a que el método no es capaz de extraer adecuadamente la parte estacionaria, otras componentes de marea que no se están resolviendo y/o a que hay errores grandes en algunas de las mediciones.

En la figura 10, se presentan los parámetros de las elipses de las corrientes de marea de la frecuencia M_2 que resulta de este ajuste. La distribución de los contornos de fase (Figura 10a), muestra que las corrientes máximas ocurren antes en la parte norte del golfo y como 1.7 horas (50°) después en la zona de las islas San Esteban y San Lorenzo. Todas las fases en este trabajo están referidas a las 00:00 GMT del 1° de enero de 2002. Los contornos del semieje mayor (Figura 10b) muestran los lugares en los cuales se alcanzan las máximas velocidades, y se encuentran localizadas en el canal de Ballenas y a ambos lados del golfo en islas de la parte central. Los valores de 0.5 m/s se extienden hacia la parte norte del golfo. Sin embargo estos valores, junto con los valores de hasta 1.5 m/s cerca de las costas de Sonora, son extrapolaciones espúreas donde casi no hay datos. La línea punteada en todos los mapas indican la zona donde hay datos. Jiménez [2003] obtuvo valores de eje mayor de las corrientes para la componente M_2 de unos 0.2 m/s cerca de las costas de Sonora donde aquí se obtienen los valores más altos.

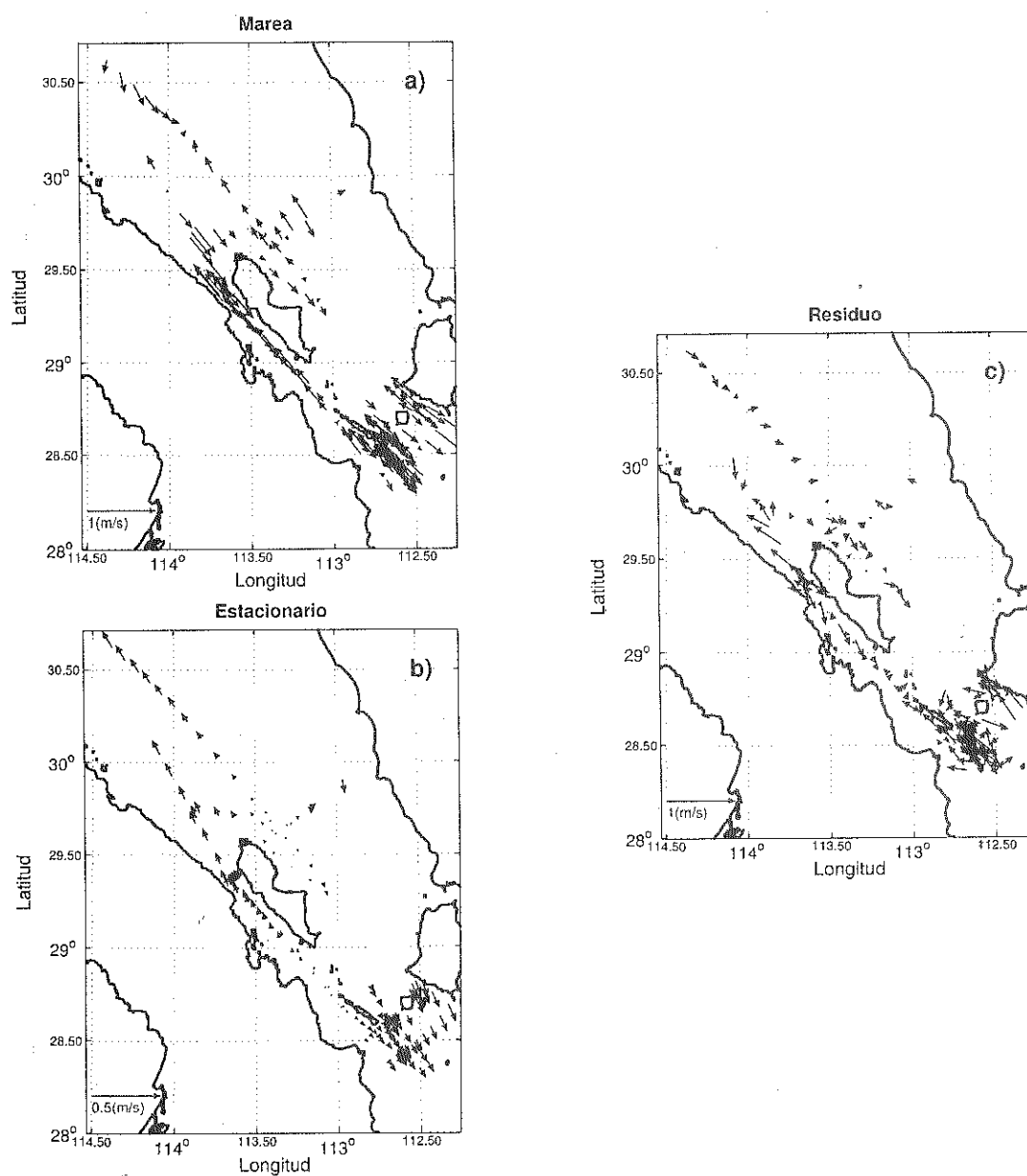


Figura 9: Campo de corrientes. (a) Marea M_2 . (b) Estacionario. (c) Residuos. Correspondientes al crucero de marzo.

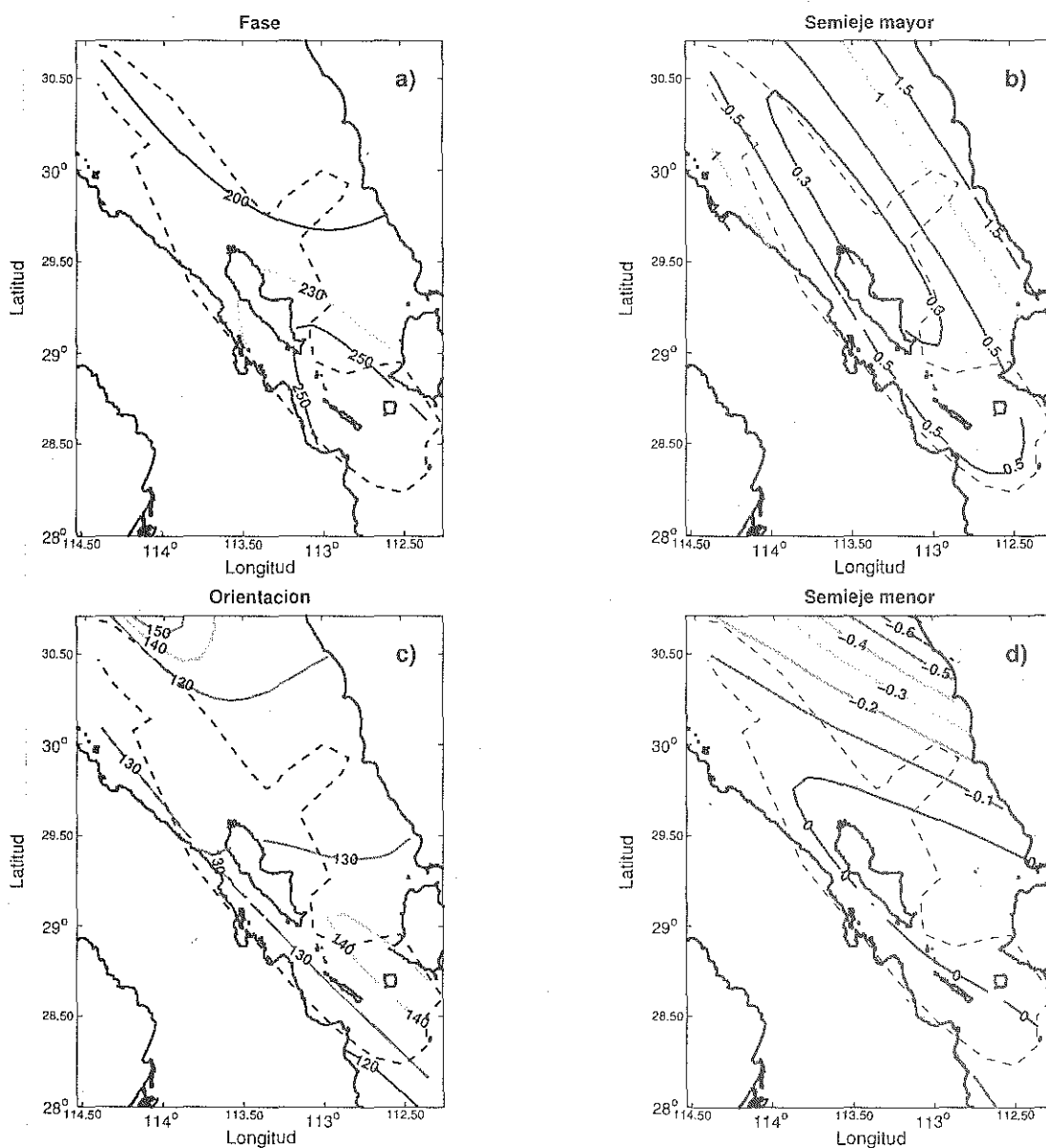


Figura 10: Contornos de los parámetros de la elipse de marea para la frecuencia M_2 del ajuste básico. (a) Fase (en grados). (b) Semieje mayor (m/s). (c) Orientación (en grados). (d) Semieje menor (m/s). La línea punteada marca la zona donde se concentran los datos. Crucero de marzo.

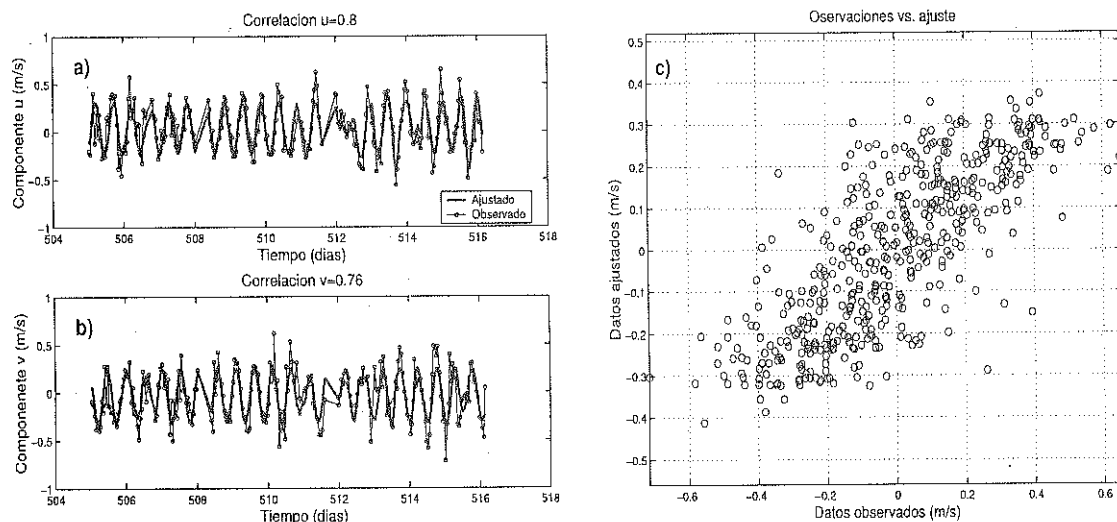


Figura 11: Comparación de las observaciones con el ajuste para (a) la componente u y (b) para la componente v. (c) Gráfica de observaciones vs Ajuste. La parte estacionaria se expandió con un polinomio de grado uno y la parte que involucra a la componente M_2 con uno de grado dos. Crucero de mayo.

La inclinación del semieje mayor con respecto al Este (Figura 10c) mantiene ligeras desviaciones en algunas regiones que van de 5 a 10 grados por arriba de la orientación que tiene el Golfo. La corriente de marea se mantiene rectilínea ya que se encontraron semiejes menores casi nulos (Figura 10d).

III.1.2. Ajuste realizado con datos del crucero de mayo de 2003

Las observaciones de este crucero se concentraron en la zona de las islas centrales. Se encontró una correlación de 0.78 entre los datos y el ajuste. La función ajustada se muestra en la figura 11, y se ve que pasa por la mayoría de los puntos observados, a excepción de los valores cercanos a los 0.5 m/s para cada componente. La gráfica de las observaciones en un eje y los valores ajustados en otro muestra que la distribución tiende a estar concentrada alrededor de una línea recta con pendiente cercana a los 45° como se observa en la figura 11c.

Para este caso la corriente máxima encontrada (0.82 m/s) se localizó al sur de la Isla San Esteban que se visualiza fácilmente en la figura 12a, notese que hay una gran cantidad de observaciones en el canal de San Esteban en donde se hicieron varios transectos a través del canal. Lo complicado de la batimetría en ese lugar puede estar afectando el método ya que no pudo reproducir velocidades de esta magnitud, y el vector la velocidad más grande en el ajuste (figura 12b) es de 0.6 m/s localizado en (-112.54,28.49) donde hay una profundidad aproximada de 874 m.

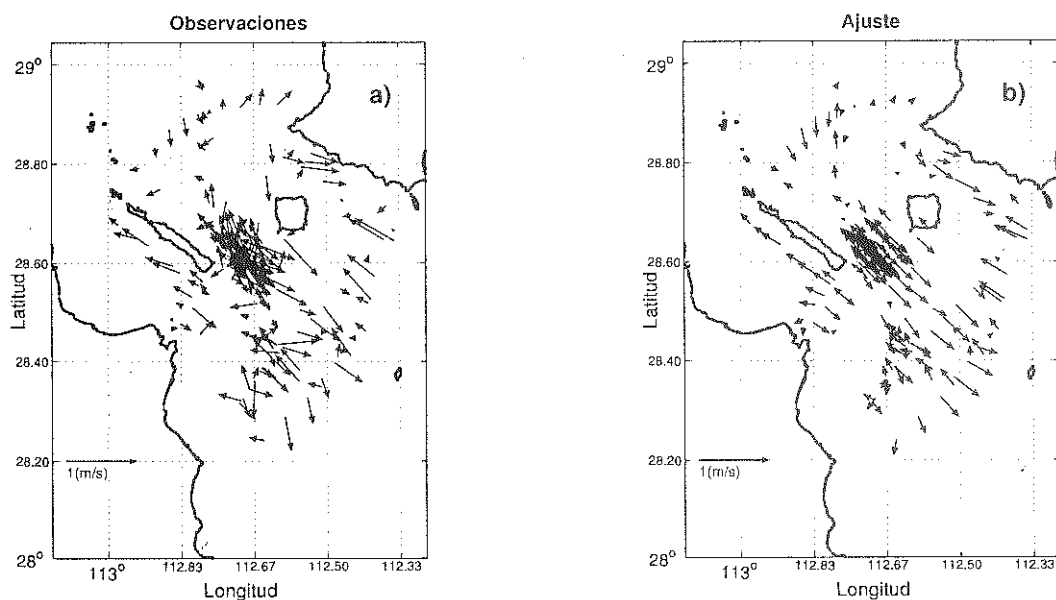


Figura 12: Campo de velocidades (a) observado y (b) ajustado. La aproximación fue hecha con los datos de mayo.

Nuevamente el residuo (Figura 13c) es mayor que el término subinercial (Figura 13 b), lo cual puede también deberse a que la parte estacionaria no se puede extraer adecuadamente debido a la presencia de otras componentes de marea y/o a que hay errores grandes en algunas mediciones. La región de los datos para este cruceo está marcada con una línea punteada, donde los campos ajustados en el interior de esta área se encuentra casi en fase (Figura 14a), que concuerda con lo que se obtiene para

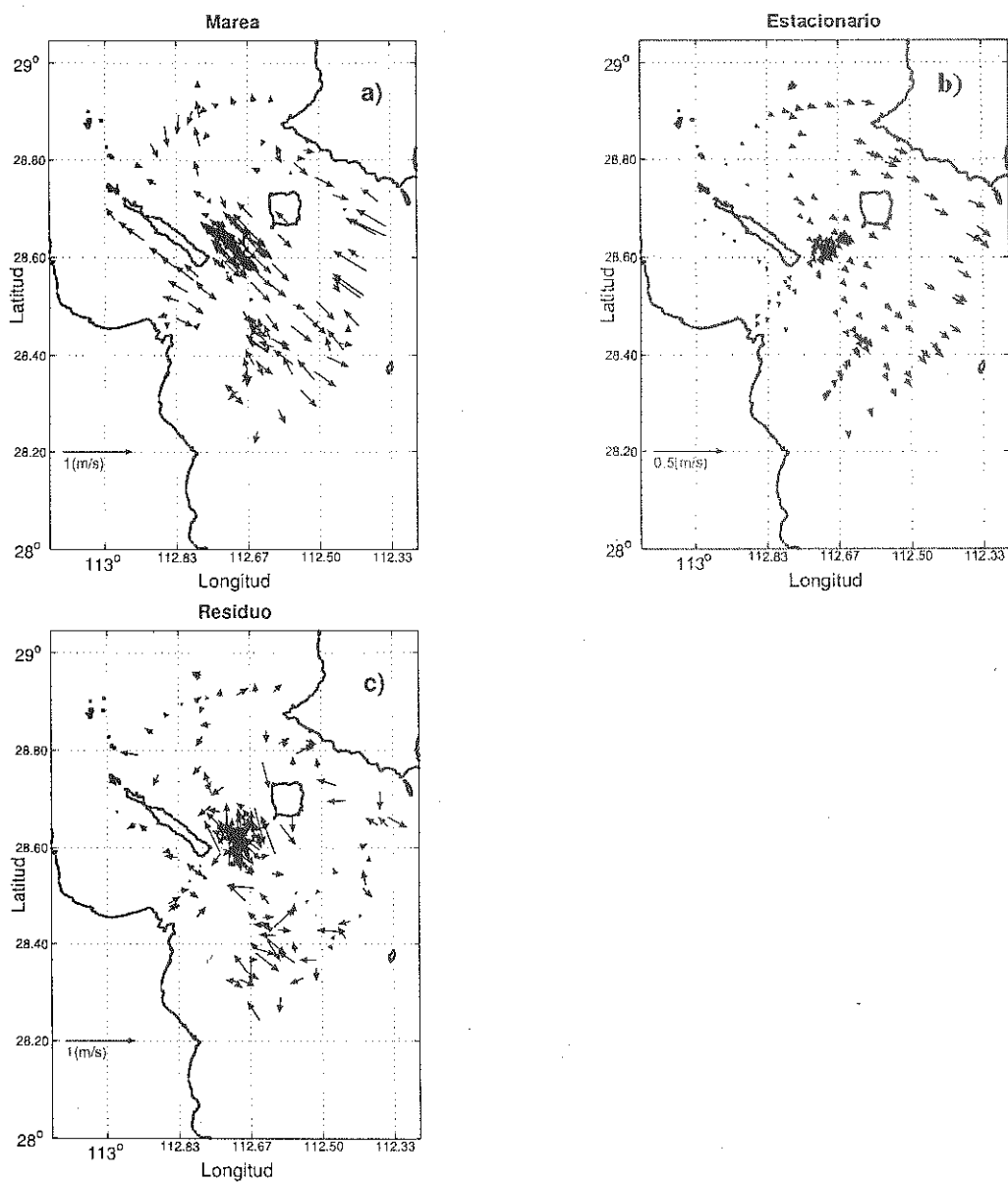


Figura 13: Campo de corrientes. (a) Marea. (b) Estacionario. (c) Residuos. Correspondiente al crucero de mayo.

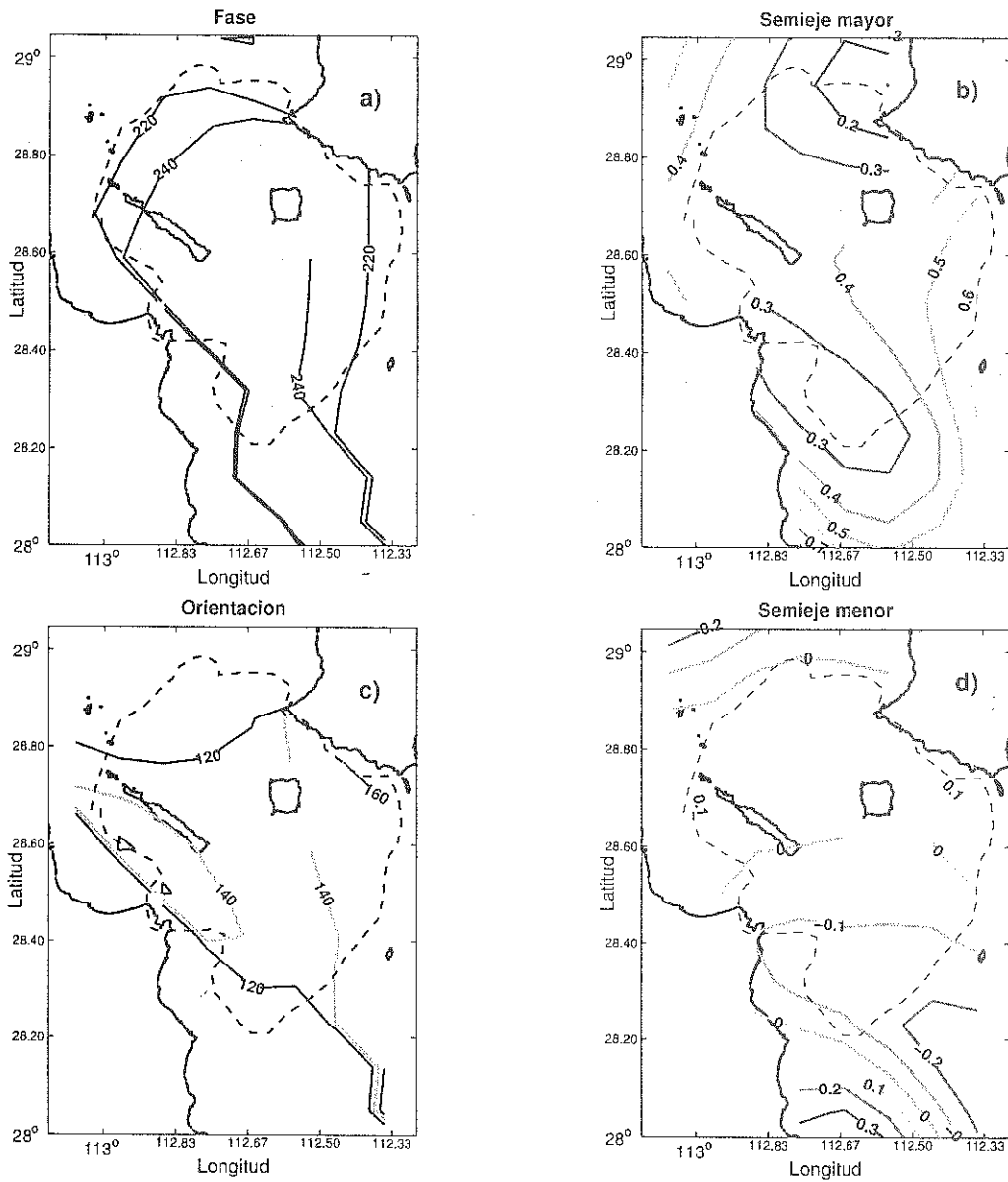


Figura 14: Contornos de los parámetros de la elipse de marea para la frecuencia M_2 del ajuste básico. (a) Fase (en grados). (b) semieje mayor (m/s). (c) Orientación (en grados). (d) Semieje menor (m/s). La línea punteada marca la zona donde se concentran las observaciones. Crucero de mayo.

el crucero de marzo. Esta zona alcanza amplitudes del semieje mayor que van de 0.3 m/s a 0.5 m/s para la componente M_2 (Figura 14b), y la excentricidad de las elipses es casi igual que con lo obtenido para marzo es decir las corrientes de marea para esta componente son casi rectilíneas (Figura 14d). La orientación de las elipses puede verse con un poco más de resolución, y son cercanas nuevamente a la orientación del golfo. Además, puede observarse que fuera de la línea punteada los parámetros de las elipse tiene grandes variaciones y por lo tanto el método claramente no es bueno para extrapolar.

III.1.3. Ajuste realizado con la combinación de datos de los dos cruceros

Al combinar los datos de los dos cruceros se pudo expandir la parte diurna (K_1 y O_1) y semidiurna (M_2 y S_2) con polinomios de grado variable. En particular el caso con $D_{M_2}=D_{S_2}=2$, y $D_{K_1}=D_{O_1}=D_{est}=1$, permitió sacar una mejor estructura cualitativa para las elipses de marea con frecuencia S_2 . Este ajuste aumento la correlación a 0.85. Se observó que una de las ventajas al incluir mas frecuencias en el análisis, fue la disminución en el residuo. El error cuadrático medio del residuo cuando se incluye solo a la frecuencia M_2 es de $0.064 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y si se incluyen además la S_2 , la K_1 y la O_1 es de $0.052 \text{ m}^2/\text{s}^2$. La magnitud de la velocidad como se observa en la gráfica 15 resultó mejor ajustada cuando se tomaron en cuenta las cuatro frecuencias ya mencionadas, pues se apreció un residuo de menor tamaño en comparación con el ajuste realizado solo con la componente M_2 . Por otro lado el residuo cuando se ajustó únicamente la M_2 a cada uno de los cruceros por separado, mostró una magnitud y estructura similar a los residuos de la figura 14a.

Las diferencias de fase para la S_2 (Figura 16a) presentes en la zona son a lo más de 40° , aproximadamente un retardo de las corrientes de marea de 1.4 horas. En los semiejes mayores (Figura 16b) la amplitud es aproximadamente 40% de la M_2 ,

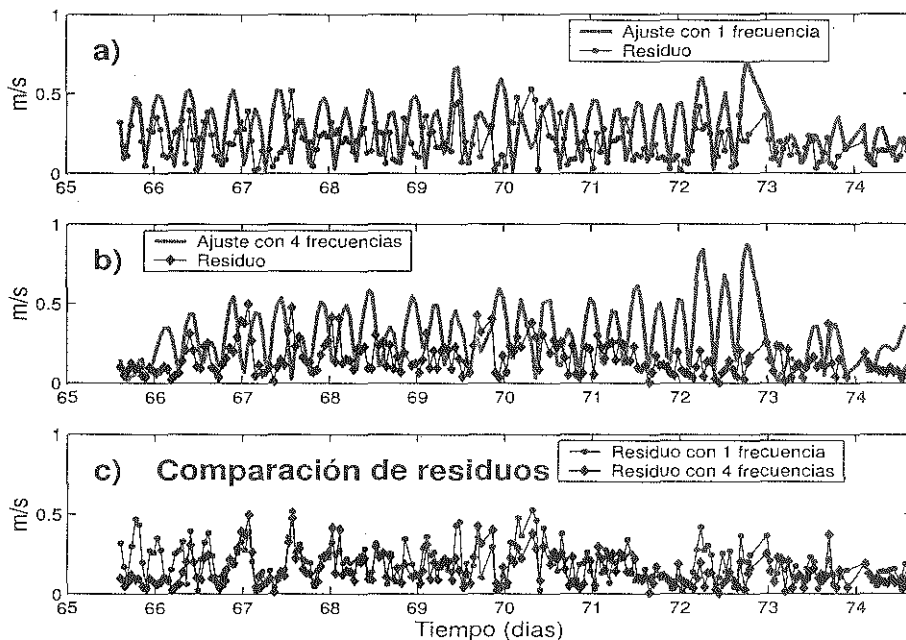


Figura 15: (a) Gráfica de la magnitud de \vec{v} y su residuo ajustando únicamente la frecuencia M_2 . (b) Gráfica de la magnitud de \vec{v} y su residuo ajustando las frecuencias M_2 , S_2 , K_1 y O_1 . (c) Comparación de los residuos en (a) y (b). Se utilizan datos de los dos cruceros.

y tiende a incrementarse hacia la cabeza del Golfo de California. Las orientaciones de las elipses varían entre 120° a 140° (Figura 16c) respecto al Este, que son valores cercanos a la orientación que tienen las costas. El semieje menor de aproximadamente cero (Figura 16d), indica un flujo rectilíneo.

Los ajustes realizados se comparan con los resultados obtenidos del análisis armónico de los anclajes denominados, Ballenas, San Esteban, San Lorenzo y Delfín. En el análisis armónico se tomó en cuenta solo la corriente barotrópica, es decir el promedio vertical de cada uno de los perfiles de corrientes. Los parámetros de las elipses en la tabla VI muestran poca variación de éstos entre los dos periodos de observación, lo cual indica que en cada anclaje se ha podido capturar bien la componente barotrópica de la M_2 , y son una garantía de la buena calidad de las observaciones.

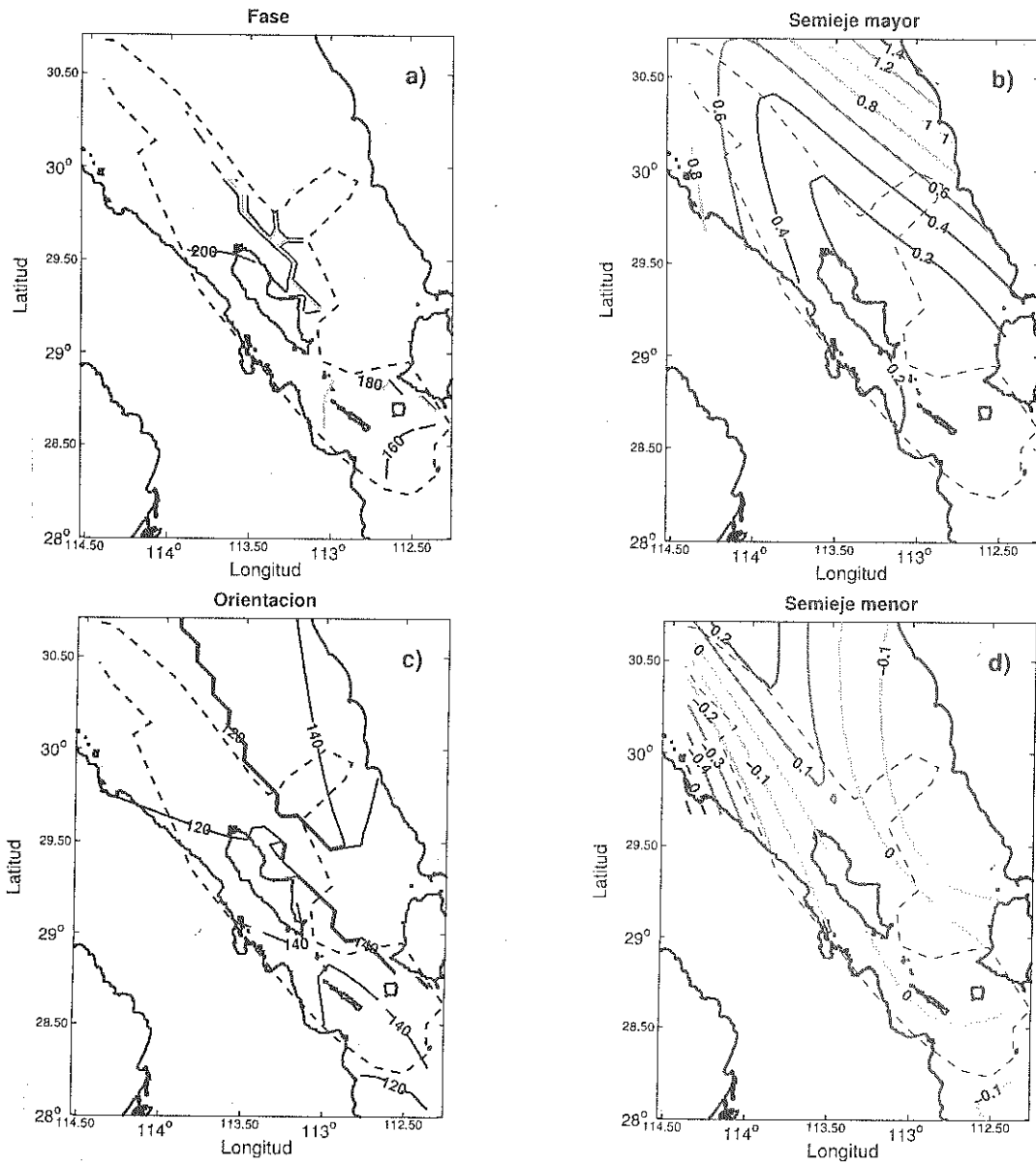


Figura 16: Contornos de las componentes de la elipse para la S_2 . (a) Fase (en grados); (b) Semieje menor (m/s). (c) Orientación (en grados). (d) Semieje mayor (m/s). La línea punteada marca la zona donde se concentran las observaciones. Datos de los dos cruceros.

Tabla VI: Componentes de las elipses de los datos anclados para la M_2 y la S_2 .

CM_2	Ballenas1	Ballenas2	San Est.1	San Est.2	San Lor.1	San Lor.2	Delfin	Delfin2
M	0.49	0.50	0.59	0.56	0.52	0.52	0.26	0.25
m	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.04	-0.03	-0.01	-0.03
θ	123	125	142	140	140	141	145	145
ϕ	221	220	230	231	235	237	224	223
CS_2	Ballenas1	Ballenas2	San Est.1	San Est.2	San Lor.1	San Lor.2	Delfin	Delfin2
M	0.29	0.31	0.32	0.35	0.27	0.32	0.15	0.16
m	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01
θ	124	125	143	141	140	142	145	145
ϕ	178	180	182	187	189	192	189	188

Nota. M es el eje semimayor, m el eje semimenor en m/s, θ la inclinación en grados y la fase ϕ esta referida al 1 de enero de 2002.

La corriente en los anclajes es prácticamente rectilínea, es decir la excentricidad de la elipse es casi cero. El anclaje Delfín fue el menos profundo (Tabla 2) y ahí la amplitud de 0.26 m/s fue la menor de todas, ya que en los otros anclajes están por arriba de los 0.5 m/s. Las inclinaciones del eje mayor en los anclajes de San Esteban y San Lorenzo, tienen una orientación de unos 15° más que la orientación del anclaje Ballenas, el cual tiene una orientación más cercana a la orientación general del golfo ($\sim 125^\circ$). Por otro lado, la orientación de las elipses en el anclaje Delfín es 20° mayor que el anclaje Ballenas, lo cual puede estar reflejando la orientación local de la topografía en la localidad [López y Garcia, 2003; Jiménez, 2003].

La fase de la M_2 en los anclajes tiende a incrementarse hacia el extremo sur de la región (Tabla VI). El mismo comportamiento se observa en el ajuste (Figura 10a), aunque en este último la disminución de la fase es significativamente mayor ($\sim 30^\circ$). La figura 17a muestra las elipses de marea de la M_2 de las series de tiempo de los anclajes, mientras que la 17b muestra la elipse del ajuste básico de los dos cruceros en las mismas localidades de los anclajes. El error del eje semimayor entre el ajuste y el análisis armónico en Ballenas es -0.07 m/s, en San Esteban de -0.24 m/s, en San

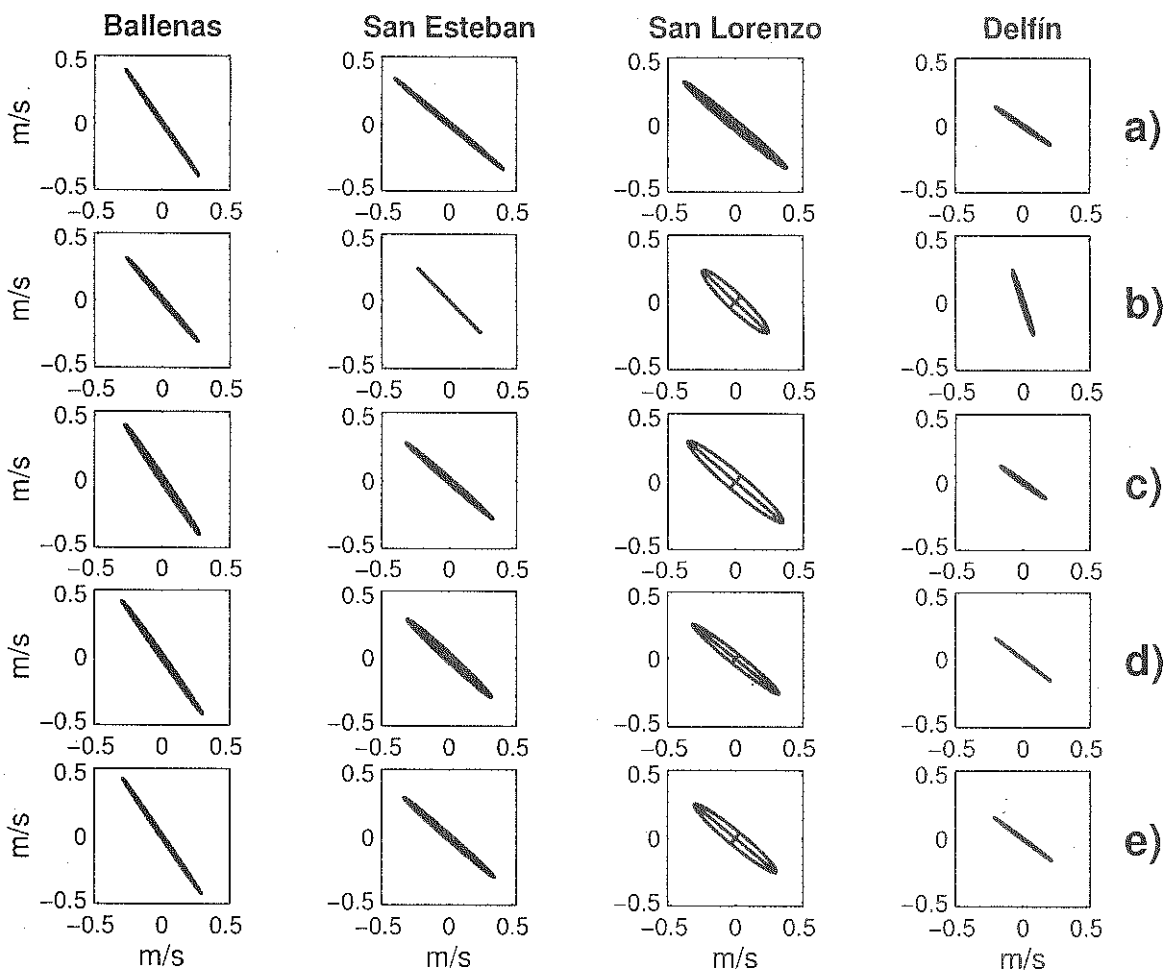


Figura 17: Comparación de las elipses de marea (frecuencia M_2) en los puntos de los anclajes. (a) Datos de anclajes. (b) Ajuste básico. (c) Igual que (b) pero agregando condiciones de frontera. (d) Con datos de anclajes y condiciones de frontera. (e) Con datos de anclajes. Correspondiente al cálculo hecho con la mezcla de datos de los dos cruceros.

Lorenzo de -0.17 m/s y en Delfín de solo 0.01 m/s. El semieje menor en todos los casos es bien reproducido, tendiendo a cero. La diferencia mayor entre los ángulos de inclinación, se localiza en el anclaje Delfín, con un error de -37° , la menor en San Lorenzo con -3.7° , en San Esteban esta desviación es de -7.5° y en Ballenas de 7° . Las diferencias de fase con el ajuste fueron menores en Ballenas y Delfín, con 1.7° y 3° respectivamente, y para las otras dos localizaciones restantes fue de 23° .

Para el ajuste básico de la S_2 en el anclaje Ballenas se obtuvo que la amplitud es

de 0.36 m/s, sólo 0.07 m/s por arriba de la elipse del anclaje, la inclinación de 130.1 grados y la diferencia de fases entre el ajuste y la elipse del análisis armónico es de 16.9 grados. Para San Esteban y San Lorenzo la corriente ajustada con datos de los dos cruceros alcanza los 0.15 m/s y 0.16 m/s respectivamente, estos valores subestiman las correspondientes elipses de los anclajes en -0.17 m/s y -0.12 m/s; las orientaciones están 3 y 8 grados arriba de los valores observados que son de 140 y 145 grados para San Esteban y San Lorenzo, respectivamente, mientras que la diferencia de fase con la elipse observada es de -17.9 y -30 grados. Para la serie Delfín el único parámetro que es mas subestimado es la fase, ya que esta 21 grados arriba del valor observado que es de 189 grados (Figuras 17a y b). Todas las comparaciones se concentran en las tablas de los apéndices A1. La fase ajustada para esta componente, muestra un incremento de sur a norte (Figura 16a), sin embargo del análisis armónico se puede ver que el comportamiento es similar al patrón de la M_2 (Tabla VI), es decir las amplitudes máximas se alcanzan primero en la parte norte.

III.2. Ajustes con condiciones de frontera

El método tiene problemas de ajuste fuera del dominio de los datos por eso se obtiene sobreestimación de las componentes en las regiones donde no existen datos. Además, aunque las observaciones podrían reflejar la presencia de costas cercanas, el método de ajuste no posee ninguna información específica sobre la presencia de las costas del golfo y de las diferentes islas presentes en la región. Para incorporar información sobre la presencia de las costas se ha usado la modificación hecha por Carrillo et al. [2004] donde se implementan condiciones de frontera a lo largo de la costa. La condición de frontera utilizada en las costas, es que el flujo perpendicular sea igual a cero, es decir se impone que $\vec{v} \cdot \hat{n} = 0$, donde \vec{v} es el vector de velocidad o transporte y \hat{n} es el vector unitario normal a la costa. Los puntos marcados en la figura 19 son los lugares

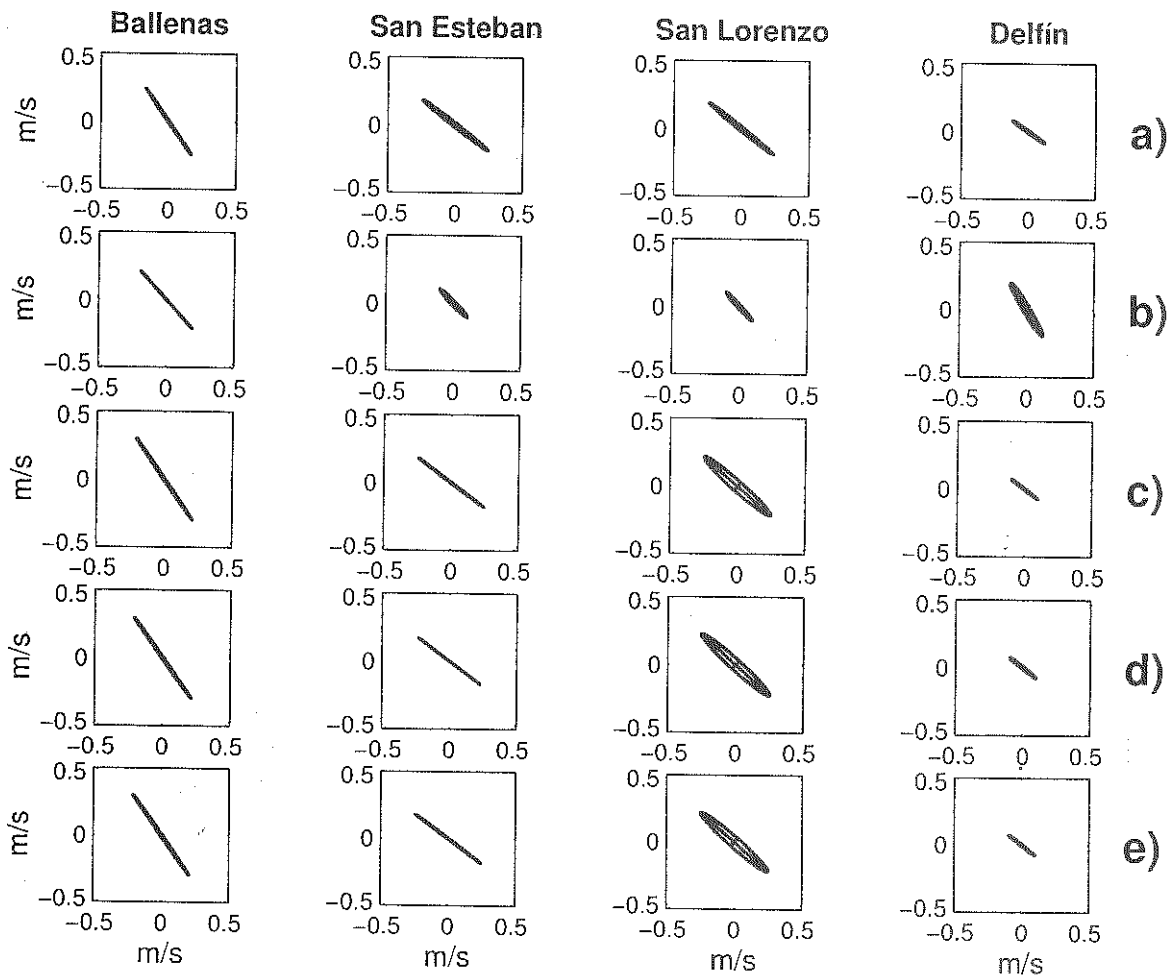


Figura 18: Comparación de las elipses de marea (frecuencia S_2) en los puntos de los anclajes. (a) Datos de anclajes. (b) Ajuste básico. (c) Con condiciones de frontera. (d) Con datos de anclajes y condiciones de frontera. (e) Con datos de anclajes. Correspondiente al cálculo hecho con la mezcla de datos de los dos cruceros.

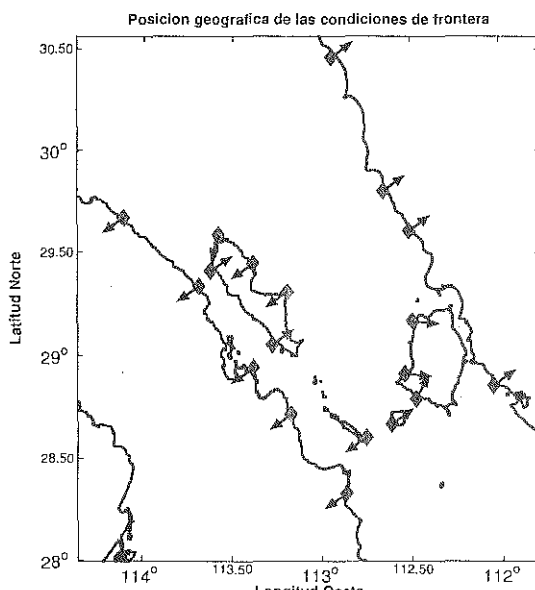


Figura 19: Posiciones de las condiciones de frontera aplicados en la zona de estudio.

que se escogieron para aplicar las condiciones de frontera. En esta figura también se observa la orientación de la normal a la costa que se escogió para cada uno de los puntos.

La figura 20a muestra las elipses de las corrientes del ajuste básico (sin condiciones de frontera) utilizando los datos de los dos cruceros y se puede apreciar el correspondiente ajuste utilizando las condiciones de frontera (Figura 20b). Claramente se ve que el ajuste mejora en la región donde no hay datos y el patrón general de las corrientes se alinea con el eje del golfo. En particular, existe una reducción significativa del eje mayor cerca de las costas de Sonora, así como una inclinación más realista de las elipses cuando se incluyen las condiciones de frontera. En la figura 17c se muestran las elipses del ajuste que incorpora las condiciones de frontera en los puntos de los anclajes. Notese como las elipses de marea concuerdan mejor con las elipses de la figura 17a. En el anclaje Ballenas la elipse se reproduce bastante bien, con un error del semieje mayor de 0.02 m/s, en la inclinación de 1.4° y en la fase de 7.2°. En San Esteban y

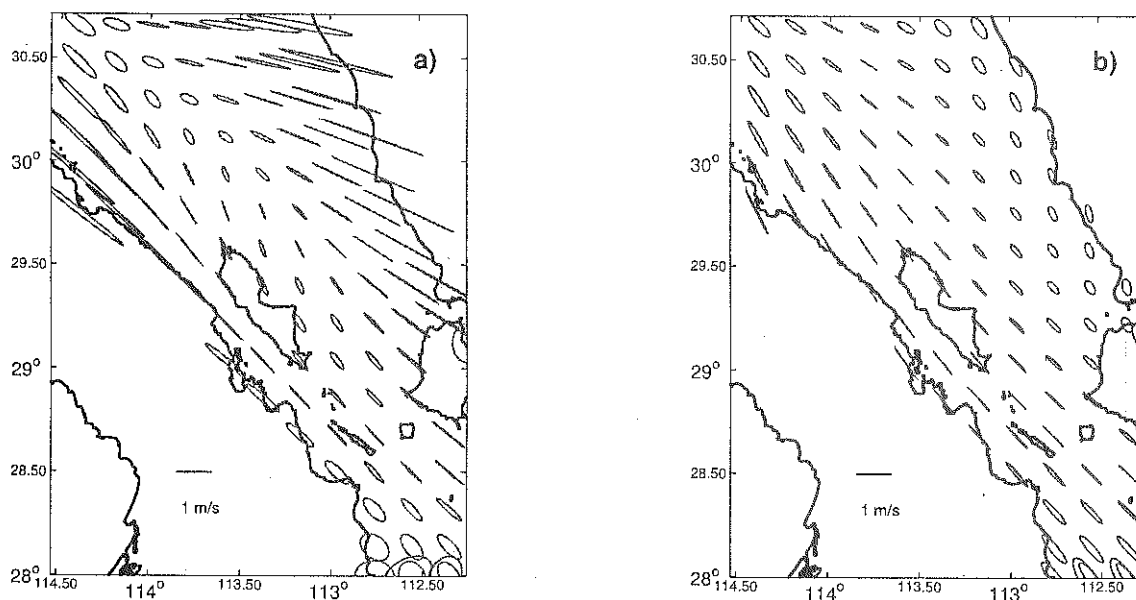


Figura 20: Elipses de marea de la frecuencia M_2 . (a) Ajuste sin condiciones de frontera y (b) con condiciones de frontera.

San Lorenzo se observó un ligero aumento del eje semimayor y de las inclinaciones con respecto al caso básico (Figura 17b), así como de un decremento en la fase, acercándose más a los parámetros de las elipses calculadas para las series de tiempo de los anclajes. Para el anclaje Delfín hubo una corrección de la orientación y en los demás anclajes los aumentos en el semieje mayor respecto al caso básico, se pueden deber a que las condiciones de frontera hacen más paralelo el flujo cerca de las costas.

III.3. Ajustes con datos de anclajes

Los datos de las series de correntímetros anclados, tienen más calidad, y por ello se incorporaron al conjunto de mediciones para ver si mejora el ajuste. Las mediciones de los anclajes se añadieron considerando dos casos distintos. Para ambos casos se consideró un periodo de 15 días pero en un caso el periodo empezó en mareas vivas (MV) y en el otro caso en mareas muertas (MM). Para estos casos las correlaciones y los números de condición son los mismos (Tabla IV), independientemente de si se

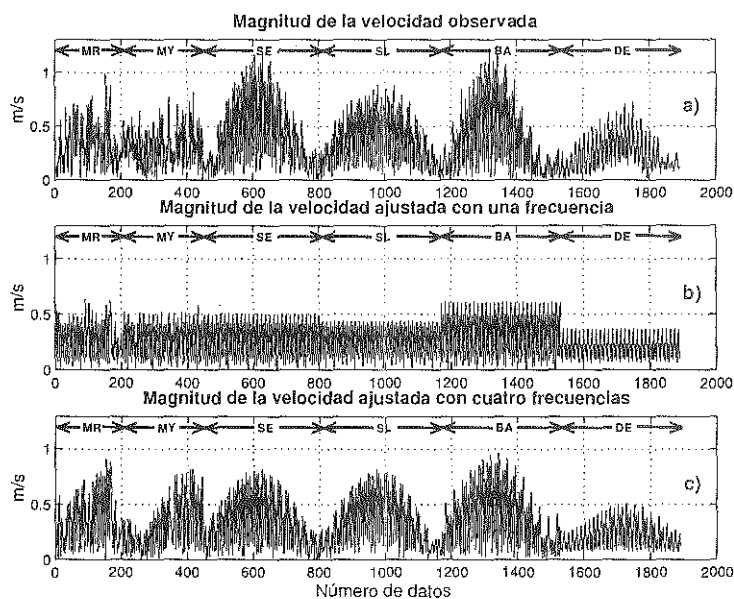


Figura 21: Magnitudes de la velocidad. (a) Observaciones. (b) Ajuste con una frecuencia y (c) Ajuste con 4 frecuencias. MR significa que son datos del crucero de marzo, MY crucero de mayo, BA de Ballenas, SE de San Esteban, SL de San Lorenzo, y DE de Delfín. El eje horizontal no tiene correspondencia con el tiempo.

utilizaron datos en mareas vivas o muertas. La figura 21 muestra las magnitudes de la velocidad observada y ajustada con todos los datos de los cruceros y de los anclajes y son una prueba de que cuando se incluyen más constituyentes de marea el ajuste mejora bastante y las elipses en los puntos de los anclajes se parecen más a las que se obtuvieron con el análisis armónico de los datos anclados (Figura 17a). La misma característica se obtiene si además se agregan condiciones de frontera, pero esperando que con esta combinación, el semieje mayor en las costas sea similar a la del ajuste con condiciones de frontera (Figura 22a) porque refleja mejor concordancia con lo obtenido por otros autores [Jiménez, 2003]. Para ello, el tiempo de aplicación de las condiciones de frontera se modificó para que durara lo mismo que un periodo de mareas muertas o vivas cuando se incluyen datos de correntímetros. Si las observaciones son más numerosas que las condiciones de frontera, el ajuste en zonas cercanas a las costas siguen presentando sobrestimaciones, en particular en la costa de Sonora indicando

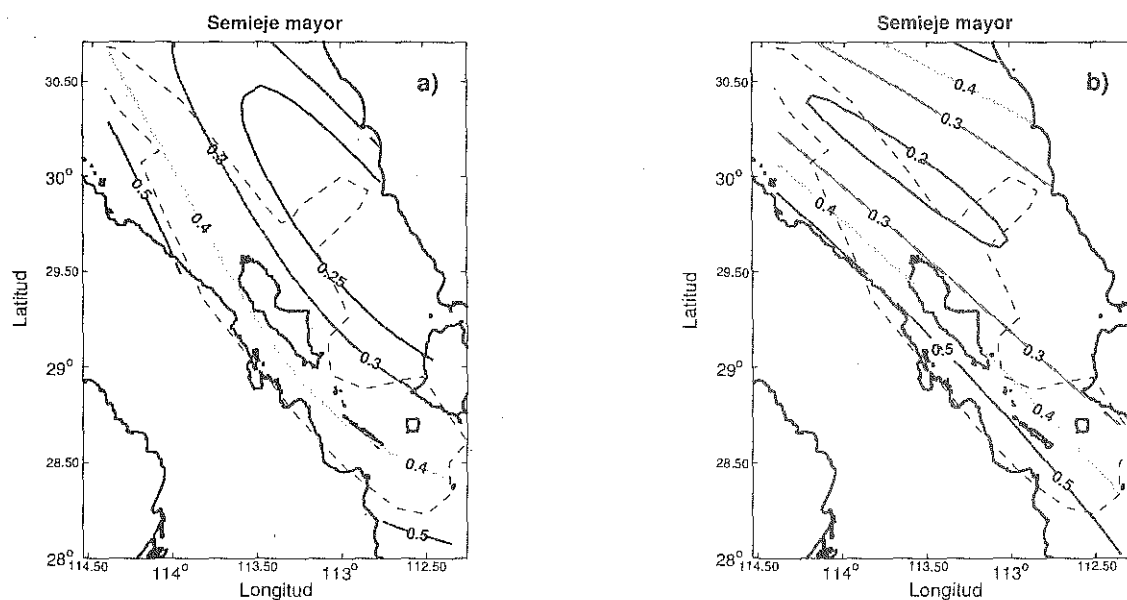


Figura 22: Amplitudes del semieje mayor para la M_2 en m/s. (a) Con el ajuste básico y (b) con el ajuste agregando datos de correntímetros con condiciones de frontera y frecuencias S_2 y K_1 .

que el ajuste tiene más peso sobre las observaciones. El resultado que se obtiene de combinar las condiciones de frontera con datos de anclajes es que el semieje mayor no presenta valores muy altos cerca de las costas y las corrientes máximas ocurren casi de forma simultánea sobre la zona (Figura 23b). Obsérvese que las amplitudes y fases de corriente para la M_2 concuerda más con la información del análisis armónico de los datos adquiridos por medio de anclajes.

III.4. Ajustes añadiendo constantes armónicas del nivel del mar

Una de las ventajas de hacer el ajuste para el transporte es que utilizando la ecuación de continuidad [ec. (15) que aparece en la sección II.2.3] y estimando la divergencia horizontal del transporte a partir de los campos ajustados, se puede obtener el mapa cotidal de la elevación del mar debida a la marea y ello permite comparar

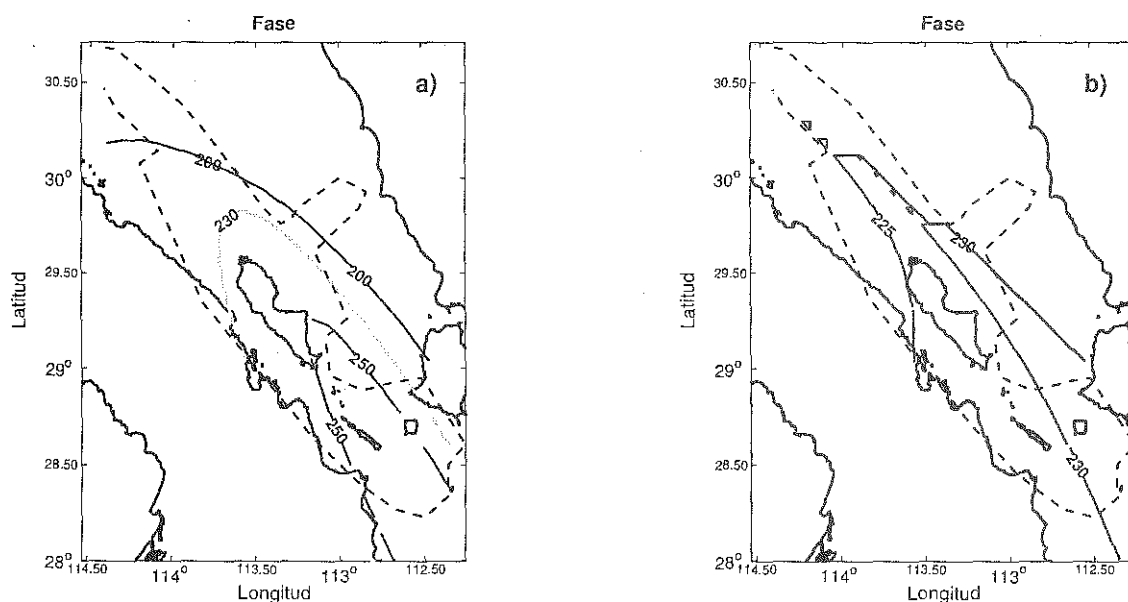


Figura 23: Fases del semieje mayor para la M_2 en grados. (a) Ajuste básico agregando constantes armónicas y (b) el ajuste de (a) agregando datos de correntímetros con condiciones de frontera y frecuencias S_2 y K_1 .

con mapas cotidales basados en observaciones [Candela et al., 1992]. Sin embargo, una primera estimación de la amplitud del nivel del mar basada en la divergencia del transporte arrojó valores muy altos de amplitud. Por ello se decidió incorporar constantes armónicas del nivel del mar al ajuste, tal como se describe en la sección II.2.3. Además de ayudar en la estimación de los mapas cotidales, la incorporación de constantes armónicas del nivel del mar también puede ayudar a un mejor ajuste del transporte, ya que se está incorporando cierta información sobre la dinámica, a través de la ecuación de continuidad.

Si el ajuste se realiza únicamente con los datos del nivel del mar, la estructura ajustada de la marea se mantiene casi igual que en el caso básico. Por ejemplo las diferencias de fase siguen siendo relativamente altas sobre la región (Figura 23a), mientras si se agregan condiciones de frontera y datos de anclajes las elipses cambian

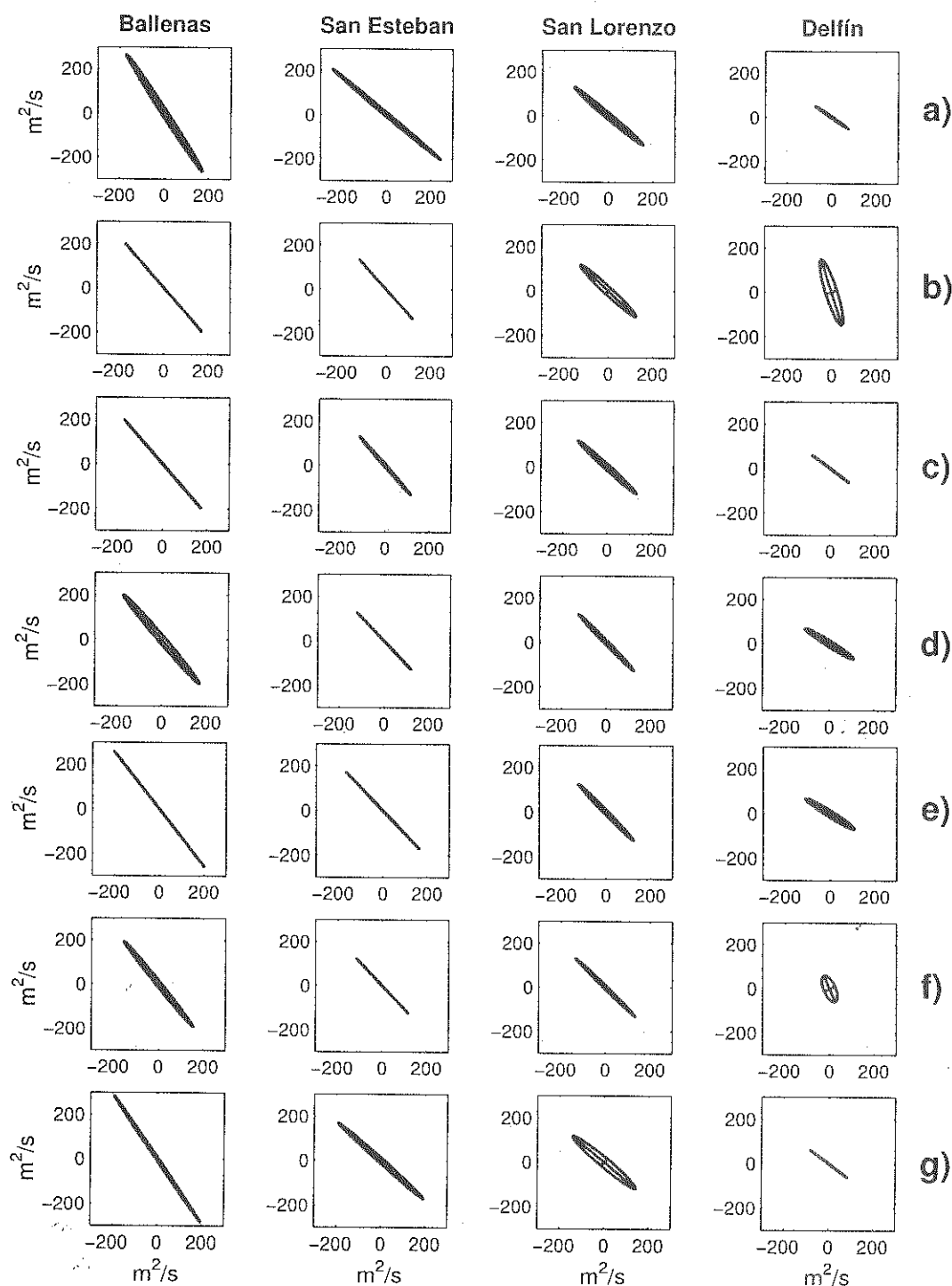


Figura 24: Elipses de transporte (frecuencia M_2) calculadas sobre los anclajes. (a) Datos anclados. (b) Ajuste básico. (c) igual que (b) pero con condiciones de frontera. (d) Con ajuste a la ecuación de continuidad. (e) Con datos de anclajes y ajuste a la ecuación de continuidad. (f) Con ajuste a la elevación mas condiciones de frontera. (g) Con condiciones de frontera y datos de anclajes. Grado polinomial usado para las componentes diurnas K_1 y O_1 , de 1er grado y de 2do para M_2 y S_2 .

de forma (Figura 24c, d y f). Los ajustes al transporte muestran un coeficiente de correlación aceptable (Tabla V), y las elipses de transporte en los puntos de los anclajes (Figura 24) son comparables a los resultados del análisis armónico (Figura 24a), y son similares a las elipses obtenidas a partir de la velocidad. Los errores en las inclinaciones y fases son del mismo orden que el que se describe para los ajustes de a la velocidad (ver tablas del apéndice A2), y los semiejes mayores y menores son los que presentan mayores problemas aún introduciendo datos de anclajes. En particular hay una subestimación del eje mayor en San Lorenzo y San Esteban y sobreestimación en Ballenas y Delfín (Figuras 24e y g).

Existen varios armónicos de nivel del mar alrededor del golfo norte (v.gr., Morales y Gutiérrez, 1989), pero en este trabajo se incorporan las constantes armónicas de datos de presión subsuperficial a través del golfo y dos estaciones de las consideradas por Morales y Gutierrez [1989], (Tabla VII). Los sensores de presión se encuentran esencialmente en la misma posición a lo largo del golfo, pero cubren toda su sección transversal. Los cambios de fase son pequeños ($\sim 10^\circ$) a través del golfo, pero con la variación que se esperaría del modelo de una onda de Kelvin incidente y otra reflejada (estaciones del lado continental deben tener fases más pequeñas).

La amplitud y fase de elevación calculada en los puntos monitoreados por los sensores de presión obtenidas del análisis armónico se muestran en la tabla VII. Puede verse que las amplitudes aumentan hacia latitudes superiores. Las fases han sido calculadas con el origen de tiempo en el primero de enero del 2002.

Las figuras 25 y 26 muestran los mapas cotidales de la elevación (amplitud y fase) de las componentes M_2 y S_2 obtenidos del ajuste al transporte del ADCP del bar-

Tabla VII: Constantes armónicas de las series de presión subsuperficial y nivel del mar.

Nombre	Longitud	Latitud	η_{M_2}	ϕ_{M_2}	η_{S_2}	ϕ_{S_2}
San Fcto	-112.87	28.43	0.42	311.47	0.21	268
San Lorezo	-112.76	28.58	0.43	301.30	0.20	268
San Esteban	-112.56	28.67	0.38	294.05	0.18	244
Tiburón	-112.47	28.81	0.47	292.31	0.22	247
Puerto Refugio	-113.58	29.58	1.00	313.01	0.54	276
Bahía San Luis Gonzaga	-114.33	29.75	1.12	317.50	0.67	277

Nota. η es la amplitud de elevación en metros y ϕ su fase en grados.

co, incluyendo además, condiciones de frontera, datos de los anclajes y las constantes armónicas de las estaciones que aparecen en la tabla VII. En estas figuras se puede observar como la amplitud de la onda se incrementa hacia la parte norte del Golfo y las fases aumentan de este a oeste. Esta información es comparable con los resultados de Morales y Gutiérrez [1989]. Las diferencias en amplitud entre el ajuste y las observaciones para la M_2 , son menores que 6.6 cm en todas las estaciones, a excepción de Puertecitos y Roca San Jorge que se encuentran en el norte (Tabla VIII). Para la S_2 la amplitud se reproduce mejor, con diferencias que van desde 0.4 a 5.9 cm (Tabla X). Con lo que respecta a las diferencias de fase de el ajuste con las observaciones, en Bahía San Luis Gonzaga se encontró la de mayor tamaño para la M_2 con 6.4° y la más grande para S_2 en Isla San Esteban con 10.7° . En general las diferencias son pequeñas tanto en la región de las islas como en el norte. En las tablas VIII a XI también se incluyen algunas comparaciones entre el modelo de Marinone [1997] y observaciones. Como se puede observar, las diferencias entre modelo y observaciones son comparables a las diferencias entre el ajuste y las observaciones.

Otra característica de la onda de marea en el golfo al norte del punto anfodrómico, es que la elevación máxima ocurre después que la corriente máxima hacía la cabeza. Las observaciones muestran que las diferencias de fase de la corriente y la marea cerca

Tabla VIII: Amplitudes observadas (η_{obs}), modeladas (η_{mod}) y ajustadas (η_{aju}) para la componente M_2 de la elevación.

Estación	η_{obs}	η_{aju}	$\eta_{mod}-\eta_{obs}$	$\eta_{aju}-\eta_{obs}$
Puerto Refugio*	100.6	94.1	7.4	-6.5
Bahía de los Angeles*+	65.6	71.3	7.6	5.7
Isla San Esteban+	38.1	42.0	3.9	3.9
San Francisquito+	41.9	39.3	-1.6	-2.6
Isla Tiburón+	46.8	43.7	1.1	-3.1
Bahía San Luis Gonzaga*	111.5	115.6		4.1
Isla San Lorenzo+	43.4	42.8		0.2
Ballena	93.3	86.1		2.5
Puertecitos*	128.3	143.1		14.8
Roca San Jorge*	152.6	142.4		-10.3

Nota. Las amplitudes están dadas en centímetros. + Series usadas para ajustar la marea. * Las constantes armónicas de estas series fueron calculadas por Morales y Gutierrez [1989] y η_{mod} es del modelo de Marinone [1997].

Tabla IX: Fases observadas (ϕ_{obs}), modeladas (ϕ_{mod}) y ajustadas (ϕ_{aju}) para la componente M_2 de la elevación.

Estación	ϕ_{obs}	ϕ_{aju}	$\phi_{mod}-\phi_{obs}$	$\phi_{aju}-\phi_{obs}$
Puerto Refugio*	59.1	62.2	7.4	3.1
Bahía de los Angeles*+	58.7	65.1	7.6	6.4
Isla San Esteban+	42.8	47.1	2.54	4.4
San Francisquito+	60.2	58.5	-1.11	-1.7
Isla Tiburón+	41.0	36.5	-9.2	-4.5
Bahía San Luis Gonzaga*	62.6	69.0		6.4
Isla San Lorenzo+	50.0	54.2		4.2
Ballena	59.6	65.5		5.9
Puertecitos*	66.1	67.5		1.4
Roca San Jorge*	54.6	53.0		-1.6

Nota. Las fases están dadas en grados respecto al meridiano 105 al Oeste de Greenwich. + Indica que las constantes armónicas de este sitio se incluyeron para ajustar la marea. * Series de datos analizadas por Morales y Gutierrez [1989] y ϕ_{mod} es del modelo de Marinone [1997].

Tabla X: Amplitudes observadas (η_{obs}), modeladas (η_{mod}) y ajustadas (η_{aju}) para la componente S_2 de la elevación.

Estación	η_{obs}	η_{pol}	$\eta_{mod}-\eta_{obs}$	$\eta_{aju}-\eta_{obs}$
Puerto Refugio*	56.4	52.8	0.9	-3.6
Bahía de los Angeles*+	35	40.4	2.2	5.4
Isla San Esteban+	17.6	18.8	0.6	1.2
San Francisquito+	20.6	19.4	-0.5	-1.2
Isla Tiburón+	22.5	18.7	0.0	-3.8
Bahía San Luis Gonzaga*	67.2	68.7		1.5
Isla San Lorenzo+	20.2	20.6		0.4
Ballena	59.6	65.5		5.9
Puertecitos*	66.1	67.5		1.4
Roca San Jorge*	54.6	53.0		-1.6

Nota. Las amplitudes están dadas en centímetros. + Indica que las contantes armónicas de este sitio se incluyeron para ajustar la marea. * Series de datos analizadas por Morales y Gutierrez [1989] y η_{mod} es del modelo de Marinone [1997].

Tabla XI: Fases observadas (ϕ_{obs}), modeladas (ϕ_{mod}) y ajustadas (ϕ_{aju}) para la componente S_2 de la elevación.

Estación	ϕ_{obs}	ϕ_{aju}	$\phi_{mod}-\phi_{obs}$	$\phi_{aju}-\phi_{obs}$
Puerto Refugio*	59.8	62.2	5	2.4
Bahía de los Angeles*+	58.8	64.6	6.1	5.8
Isla San Esteban+	34.1	44.7	8.3	10.7
San Francisquito+	57.7	60.2	1.6	2.4
Isla Tiburón+	36.7	40.7	-8.6	4.0
Bahía San Luis Gonzaga*	60.9	68.4		7.5
Isla San Lorenzo+	45.9	53.9		8.0
Ballena	59.7	49.1		-10.6
Puertecitos*	64.9	66.9		1.9
Roca San Jorge*	59.7	52.4		-7.4

Nota. Las fases están dadas en grados respecto al meridiano 105 al Oeste de Greenwich. + Indica que las contantes armónicas de este sitio se incluyeron para ajustar la marea. * Series de datos analizadas por Morales y Gutierrez [1989] y ϕ_{mod} es del modelo de Marinone [1997].

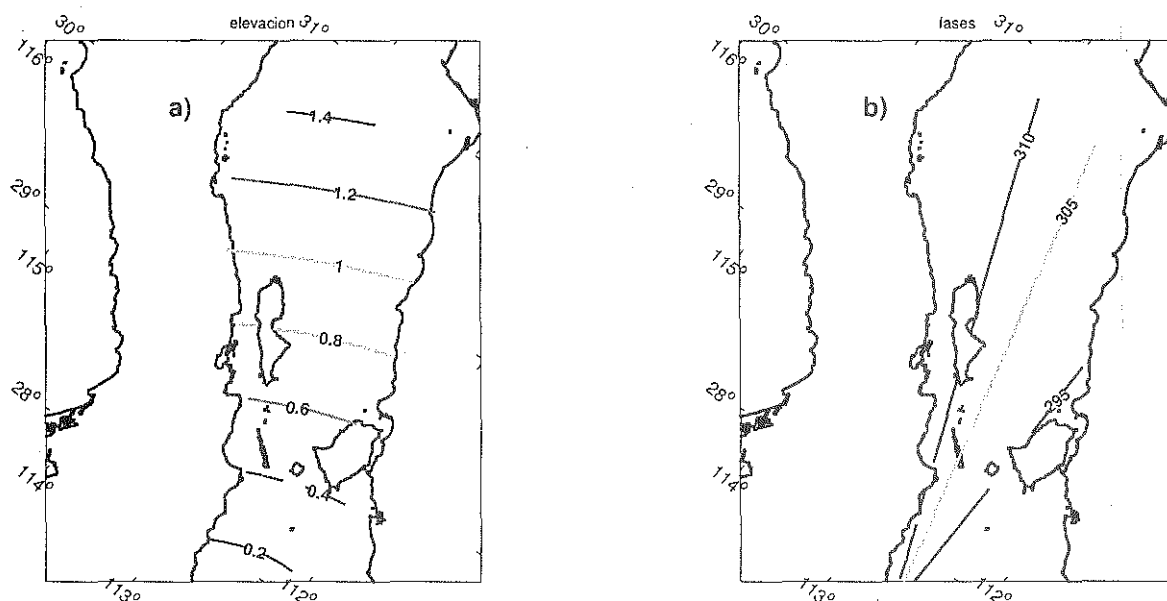


Figura 25: Mapa de amplitud y fase de elevación de la componente M_2 .

del canal de ballenas y del anclaje delfín son muy cercanas a los 90° y cerca de las islas alrededor de 70° (Tabla XII). Las amplitudes y fases de elevaciones observadas sobre los anclajes Ballenas, San Lorenzo, San Esteban y Delfín se calcularon promediando los armónicos de marea de los sensores de presión alrededor del punto geográfico o asignándole los valores de la estación más cercana. Ésto resulta ser un buen indicador de un buen ajuste. Por ejemplo, para el caso básico resultó que aunque en el norte de Isla Angel de la Guarda el desfase de la corriente y la elevación es aproximadamente 90° , para la zona de los umbrales es de entre 30 y 40 grados. Sin embargo se obtiene un mejor ajuste cuando se incluyen condiciones de frontera, datos de correntímetros y más frecuencias, ya que estas diferencias de fase se asemejan todavía más con las diferencias observadas para casi toda la zona de estudio (Tabla XII). De manera gráfica, la figura 27 complementa la descripción antes mencionada. Puede verse que en la parte norte del mapa, la onda estacionaria es bien caracterizada, mientras que por la presencia de las islas San Esteban, San Lorenzo y Tiburón, el

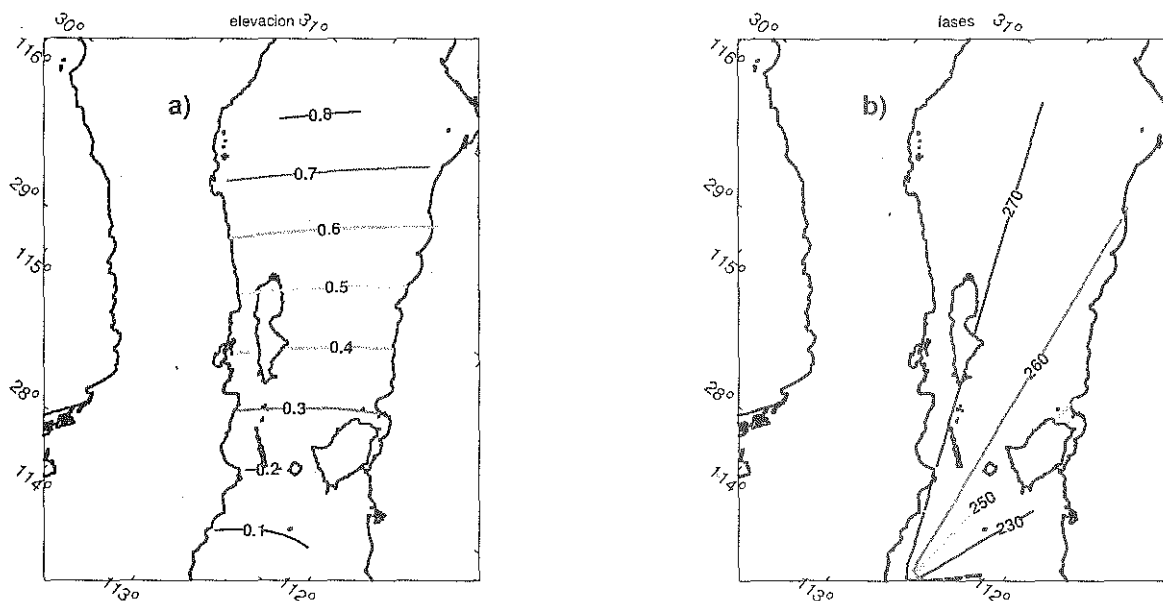


Figura 26: Mapa de amplitud y fase de elevación de la componente S_2 .

desfase entre corrientes y elevación disminuye, posiblemente debido a fenómenos locales.

III.5. Cálculo del transporte normal a lo largo de diferentes secciones

Durante cada flujo de la marea una cantidad de agua oceánica es transportada hacia el interior del Golfo de California produciendo una elevación del nivel del agua. Para cuantificar que cantidad de agua pasa por los canales del Mar de Cortés, se calculó el transporte Q , en tres secciones transversales (Figura 28) con la siguiente expresión

$$Q = \int_{r_1}^{r_2} \vec{V} \cdot \hat{n} dr \quad (16)$$

donde \vec{V} es el transporte (por unidad de longitud) que resulta de multiplicar la velocidad ajustada por la profundidad correspondiente, \vec{V} se proyecta en la dirección \hat{n} perpendicular al segmento r . Los incrementos en dr son de aproximadamente 1600 m.

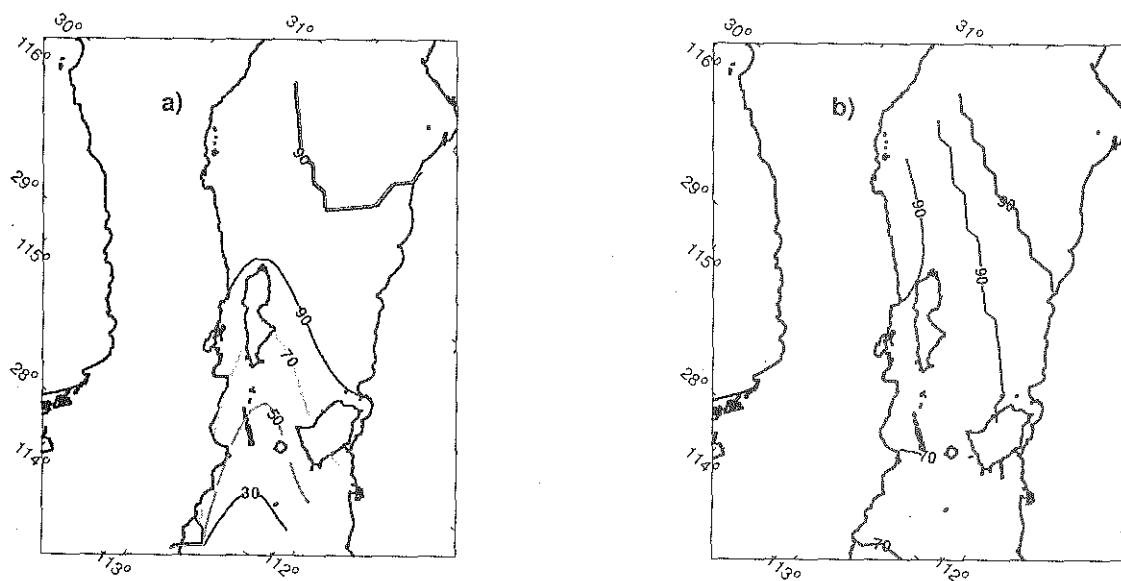


Figura 27: Desfases entre la elevación y la corriente. (a) Con el ajuste básico y (b) con el ajuste agregando condiciones de frontera y datos de anclajes.

Tabla XII: Diferencias de fase entre la elevación y la corriente para la componente M_2 .

	$(\phi_{obs} - \varphi_{obs})$	$\phi_{aju} - \varphi_{aju1}$	$\phi_{aju} - \varphi_{aju2}$
Ballenas	88	89	89
San Esteban	68	40	72
San Lorenzo	71	34	70
Delfín	89	92	78

Nota. ϕ es la fase de elevación, φ la fase de corriente en grados. El subíndice *obs* significa observada, *aju1* al ajuste básico con una frecuencia y *aju2* al ajuste con condiciones de frontera y datos de correntímetros que incluyo también a la S_2 y K_1 .

En efecto, la cantidad de agua que pasa por cada sección es proporcional al área de la sección transversal, siendo menor en el canal de Tiburón, con 1.01 Sv para la M_2 y 0.65 Sv para la S_2 . La mayor cantidad de agua fluye entre la península y la Isla San Lorenzo (S1), la M_2 contribuye con 3.31 Sv y la S_2 con 2.37 Sv. El transporte total es 10.77 Sv, aproximadamente la suma de las amplitudes de los transportes asociados a las componentes M_2 y S_2 . Ésto tiene mayor concordancia con las estimaciones de Filloux [1973], pues el calculó 7.7 Sv para la M_2 cercano a los 6.35 Sv que se cuantificó en este trabajo.

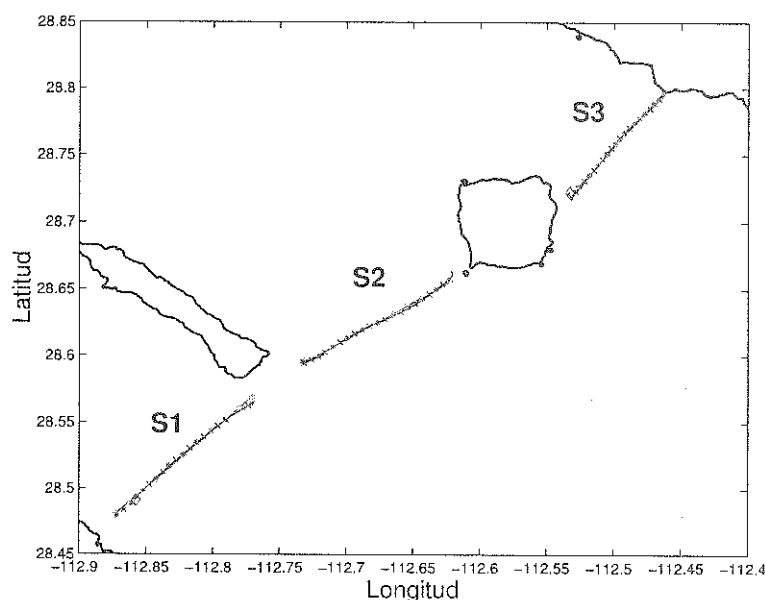


Figura 28: Secciones donde se calculó el transporte.

Un cálculo importante es el volumen de agua que entra y sale del golfo durante cada ciclo de marea, definido como el prisma de la marea, o volumen resultante del producto del área superficial del golfo y el cambio de elevación debido a la marea. Debido a que el comportamiento de la marea en la región es semidiurno, el resultado es que podemos tener un prisma de marea de $1.51 \times 10^{11} \text{ m}^3$, que implica un rango de marea promedio de 2.0 m para la M_2 y 1.35 m para la S_2 . El rango de marea promedio se sacó dividiendo el prisma de marea entre un área de $4.51 \times 10^{10} \text{ m}^2$, que es lo que

Tabla XIII: Amplitudes del transporte, prisma de marea, y amplitud de marea promedio para la componente M_2 y S_2 .

	M_2	S_2	M_2+S_2	Φ_{M2}	Φ_{S2}
Qo1	3.31	2.37	5.68	228	177
Qo2	2.02	1.41	3.44	230	177
Qo3	1.01	0.65	1.50	233	177
QT	6.35	4.43	10.77	230	178
P	9.03×10^{10}	6.10×10^{10}	1.51×10^{11}		
$2\bar{\eta}$	2.00	1.35	3.34		

Nota. Qo es la amplitud del transporte en Sverdrups ($1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), el número subsecuente indica la sección. P es el prisma de marea en m^3 y $2\bar{\eta}$ es el rango de marea promedio en m . Φ son las fases en grados.

mide la región del golfo de las islas para arriba excluyendo el área de las islas. Toda esta información se presenta en la tabla XIII y se basa en el ajuste a la M_2 y la S_2 con polinomios de grado dos, y de grado uno para la K_1 y el término estacionario, además de incluir datos de correntímetros y condiciones de frontera.

IV. Discusión

Con el método de Candela et al., [1992] se ha extraído la estructura del flujo mareal de las componentes M_2 , S_2 , K_1 y O_1 , y por primera vez se aplicó esta metodología en la Región Central del Golfo de California. Para extraer las componentes periódicas de la corriente de marea comúnmente se usa el análisis armónico, la técnica ha sido avalada en numerosos estudios ya que se predice que comportamiento tendrá la marea, pero se requieren de numerosos instrumentos de medida distribuidos en diferentes puntos geográficos, y de una gran cantidad de tiempo. La metodología que se usó en este trabajo es una extensión del análisis armónico tradicional, pues no solo se restringe a usar observaciones en un solo punto. La ventaja principal ha sido aprovechada para encontrar los términos armónicos y estacionarios a lo largo de una amplia región en las zona de los umbrales, ajustando con funciones polinomiales. La técnica se uso para ajustar la componente barotrópica de la corriente, y se mejoró cuando se consideraron condiciones de impenetrabilidad en la frontera de las regiones cercanas a la costa y con datos y de correntímetros anclados. Para ajustar el transporte se incorporaron además constantes armónicas del nivel del mar, para que así la técnica fuera capaz de ajustar la elevación de la marea.

Para el ajuste básico el crucero de marzo de 2002 muestra amplitudes del eje mayor (M) que varían entre 0.3 y 0.5 m/s en la zona donde hay datos (figura 10b) y claramente es errónea en zonas de extrapolación o donde hay pocos datos (por ejemplo, cerca de las costas de Sonora al NE de la parte norte de la Isla Ángel de la Guarda). La fase 50° (-1.7 hrs) desde la parte norte de la Isla Ángel de la Guarda hasta las islas centrales (San Lorenzo, San Esteban y Tiburón). Las corrientes son esencialmente rectilíneas (Figura 10d) y bien alineadas con el eje del golfo. La

comparación con los datos de los anclajes muestra que es razonablemente buena en la parte norte donde estuvieron los anclajes Ballenas y Delfín, excepto por la inclinación de la elipse correspondiente al anclaje Delfín. En particular, las fases tienen un error menor a 23 minutos en Delfín y menos de la mitad de éste en Ballenas. Sin embargo, para los anclajes de las islas centrales los errores en la fase son más grandes alcanzando valores de hasta 1.5 hrs. En el caso del anclaje San Esteban, también hay una subestimación significativa del eje mayor (Tabla AI.1). Para el crucero de mayo de 2003, las observaciones se concentran en la zona de las islas centrales y las variaciones de fase son del orden de 10° en la zona de buena cobertura de datos y el eje mayor varía entre 0.3 y 0.4 m/s (Figuras 14a y 14b). La comparación con los anclajes de la zona de las islas centrales es similar a la del crucero de marzo, sin embargo la fase se ajusta un poco mejor con diferencias menores a 1 hr, aunque la amplitud en ambos anclajes se sigue subestimando significativamente (Tabla AI.2). El ajuste con los datos de ambos cruces es similar a los efectuados para cada crucero por separado: relativamente bueno en la zona norte, excepto por la inclinación en Delfín, pero no tan buena para la amplitud y la fase en los anclajes de la zona sur. En este caso también se ajusta la componente S_2 y la comparación con los anclajes es similar que para el caso de la M_2 .

El ajuste con condiciones de frontera tiene un efecto significativo en el patrón general de las corrientes de marea, mejorando las amplitudes e inclinaciones en las zonas donde hay pocos o ningún dato (Figura 20), sin embargo hay una mejoría muy pequeña en la comparación con las amplitudes y fases de los anclajes de la zona de las islas centrales. Una de las mejorías más significativas es la inclinación del elipse en el anclaje Delfín.

Como era de esperarse, los ajustes que se comparan mejor con los datos anclados,

son aquellos que precisamente incluyen datos de los anclajes. En particular hay una disminución significativa en la discrepancia de las fases de los anclajes San Esteban y San Lorenzo con el ajuste, y también hay una mejor concordancia con las amplitudes de estos anclajes. Sin embargo, en todos los casos considerados hay una subestimación considerable de la amplitud del eje mayor en el anclaje San Esteban (como un 25 %). Aunque no es sorprendente que al incluir datos de los propios anclajes mejore la comparación con las constantes armónicas en esas localidades, es importante notarlo, ya que si el objetivo es tratar de obtener el mejor campo posible es necesario incorporar la mayor cantidad de datos disponible [Candela et al.,1992] y los datos de anclajes mejoran significativamente el ajuste.

Los ajustes al transporte presentan más dificultades al no poder acercarse a los parámetros de las elipses de transporte observadas para los casos que no incluyen datos de los correntímetros anclados (Tablas del apéndice A2). La mejor aproximación pareciera ser el caso en el que se incluyen datos de correntímetros que inician en marea muerta (tercer caso de la tabla A2.I). Más sin embargo, se obtuvo que el transporte ajustado no es congruente con la batimetría, pues se esperaría que las amplitudes de las elipses disminuyeran hacia aguas someras. En la Figura 29 se graficó la variación del transporte ajustado sobre secciones transversales al golfo (Figura 28) y se observa a que aún cerca de las costas los transportes son altos. Una representación más realista del transporte cerca de las costas es la que se presenta en la figura 30 y es el que se usó para estimar el transporte a través de los estrechos. Este transporte se estimó como el producto de la velocidad media ajustada por la profundidad y claramente tiende a cero conforme la profundidad tiende a cero cerca de las costas.

La ventaja de utilizar el transporte fue la obtención de mapas cotidales, ya que resultaron ser muy estables y coherentes con las observaciones y modelos de mareas

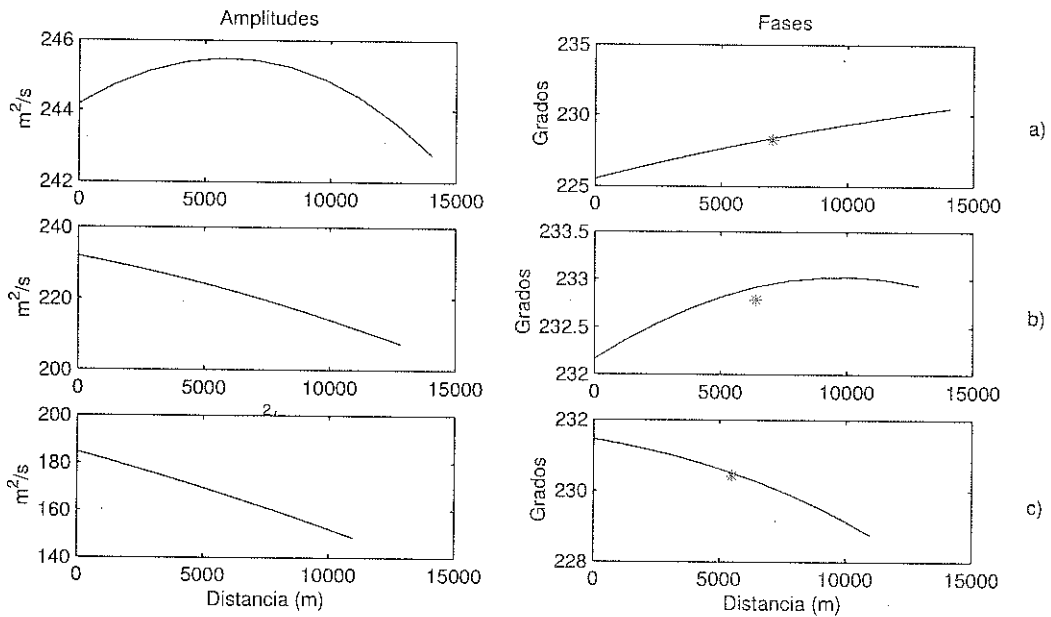


Figura 29: Amplitudes y fases del transporte ajustado. (a) para la sección S1, (b) para la sección S2 y (c) para la sección S3.

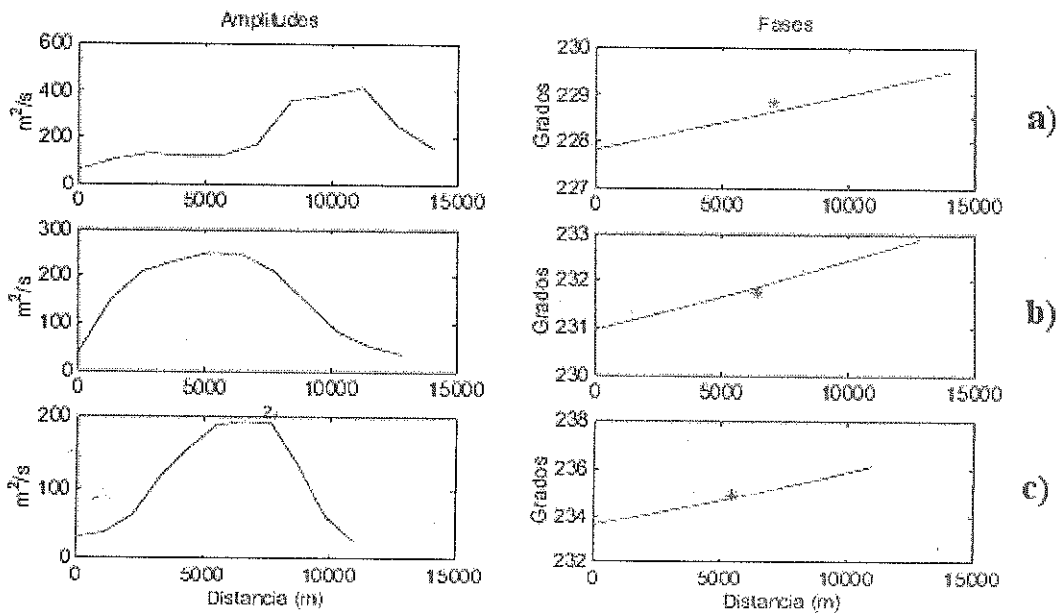


Figura 30: Amplitudes y fases ajustando primero la velocidad y multiplicando por la profundidad local. (a) para la sección S1, (b) para la sección S2 y (c) para la sección S3.

[v.gr. Morales y Gutiérrez, 1989; Argote et al., 1986; Marinone, 1997]. Los mapas cotidales, a diferencia de las corrientes ajustadas, se comportaron razonablemente incluso en regiones con pocos datos (Figuras 25 y 26). Además la comparación de constantes armónicas de la elevación entre el ajuste y observaciones es bastante buena (Tablas VIII y XI), incluso con localidades que no fueron utilizadas en el ajuste. Las diferencias entre ajuste y observaciones de elevación son comparables a las obtenidas por Marinone [1997]. Esto se puede deber a que tanto la amplitud y la fase de la elevación son funciones más suaves y con escalas más grandes que las correspondientes para las corrientes de marea. De esta manera, un polinomio de primer grado en x y y (la divergencia del transporte) es bastante adecuada para representar estos campos. A pesar de la abundante literatura sobre mareas en el golfo, en realidad no hay muchos estudios que se hayan enfocado a corrientes de mareas [v.gr., Marinone 1997; Jiménez, 2003; Filonov y Lavín, 2004] y aun menos que hayan hecho comparaciones de corrientes modeladas con observaciones como se hizo en el estudio de Marinone [2000].

Un fenómeno interesante que pudo apreciarse es un aumento ligero de las fases de corriente en dirección el sur. El comportamiento es contrario a la fase del nivel del mar que aumenta hacia el norte y también de este a oeste al norte de las islas San Esteban y San Lorenzo [Morales y Gutierrez, 1989]. Sin embargo esta disminución ligera ($\sim 10^\circ$) de la fase de la corriente hacia el norte en la zona de las islas podría deberse a fenómenos locales que se generan en esa zona. Por ejemplo, podrían deberse a ondas de Poincaré que se regeneran en la zona de las islas para que la onda tipo Kelvin pueda satisfacer las condiciones de frontera en esa zona. Se observó también el comportamiento característico de una onda estacionaria, encontrando que las diferencias de fase entre la corriente y la marea es de casi 90° en la parte norte y como 70° cerca de las islas del sur.

Tabla XIV: Componentes de las elipses de la corriente ajustada.

	BA	SE	SL	DE	δ BA	δ SE	δ SL	δ DE
M(m/s)	0.54	0.45	0.43	0.27	0.04	-0.14	-0.09	0.01
m(m/s)	0.016	-0.03	-0.04	0.02	0.18	-0.01	0.01	0.03
φ ($^{\circ}$)	125.27	137.48	141.02	142.49	2.29	-4.13	1.16	-2.57
θ ($^{\circ}$)	224.21	230.59	229.63	230.59	3.33	1.00	-5.35	6.86

Nota. M es el semieje mayor, m el semieje menor, la fase y θ la inclinación. δ es la diferencia del ajuste con la observación φ , BA, SE, SL, DE son las iniciales del nombre de cada anclaje, Ballenas, San Esteban, San Lorenzo y Delfín respectivamente. El ajuste usado fue con condiciones de frontera, datos de los anclajes BA, SE y DE donde se separó además la S_2 y la K_1 .

Al incorporar los datos de los anclajes se obtienen los mejores resultados al comparar con los propios anclajes y esto no es sorprendente. Se podría pensar que no tiene ningún objeto incorporar los datos de los anclajes y después comparar con esos mismos datos. Sin embargo se tiene que tomar en cuenta que hay otro tipo de datos que se están utilizando en el ajuste y que el objetivo es incorporar la mayor cantidad de datos posibles y de diversas fuentes que permitan obtener campos más realistas de las corrientes de marea. En este caso particular en que se está aplicando el método por primera vez al Golfo de California y que se cuenta con pocos datos de anclajes, se consideró apropiado evaluar el ajuste comparando con los datos de los anclajes aún cuando se hubieran utilizado esos datos. En un primer intento de ver la sensibilidad del ajuste a variar el número de anclajes incluidos, se hizo una prueba omitiendo el anclaje en el umbral de San Lorenzo y la Tabla XIV muestra que los resultados son esencialmente los mismos (ver Tablas XIV y A1.III).

Otro resultado interesante de este trabajo son los transportes obtenidos a través de los estrechos de las islas. Las constantes armónicas obtenidas para el transporte en los tres estrechos, permitieron estimar el prisma de marea en el golfo y éste a su vez

arroja valores bastante razonables para la amplitud promedio de la elevación en todo el golfo norte (Morales y Gutiérrez, 1989). El prisma de marea encontrado en este trabajo, contrasta con la estimación cruda de $4 \times 10^{11} \text{ m}^3$ hecha por Badan [1988]. Un resultado que puede parecer un poco sorprendente es que el transporte entre la península y la Isla San Lorenzo sea como un 60% mayor del encontrado en el estrecho de San Esteban (entre las islas San Lorenzo y San Esteban). Se podría pensar que a lo mejor la subestimación de la amplitud de la corriente en el umbral de San Esteban podría ser, en parte, responsable de este hecho. Y aunque sin duda esto podría estar contribuyendo a la gran diferencia encontrada, es también importante considerar que el área de la sección vertical del estrecho entre la Península y la isla San Lorenzo es 40% mas grande que la del estrecho de San Esteban.

En esta aplicación del ajuste a datos del ADCP del barco, no se contó con una gran cantidad de datos (aproximadamente 18 días de datos) y con una cobertura limitada en la parte norte del golfo. Por tanto, conforme se puedan ir incorporando más datos del ADCP del barco y con una mejor cobertura espacial, es de esperarse que se pueda hacer una mejor estimación de la distribución espacial de las constantes armónicas de las corrientes de marea en el Golfo de California. En cuanto a las corrientes de baja frecuencia, estas no parecen presentar un patrón muy definido y todo parece indicar que no pudieron estimarse adecuadamente. Sin embargo vale la pena señalar que el patrón encontrado en marzo de 2002 en el canal de Ballenas si se ajusta a la idea de que en ese canal existe una divergencia del flujo superficial, con flujo saliendo en ambos extremos de esta cuenca.

El método resultó ser confiable, y conforme más datos sean añadidos en un futuro se podrá tener aun mejores estimaciones, una muestra de ello es que cuando introduci-

Tabla XV: Tabla de rms para la componente M_2 y S_2 en diferentes ajustes.

Caso	Con datos de marzo		Con datos de marzo con mayo			
	rmsu	rmsv	rmsu	rmsv	rmsu	rmsv
Básico	15.84	12.64	12.59	12.1	9.46	9.59
Básico +MM	4.56	3.39	5.6	3.57	3.14	3.54
Básico+MV	4.45	4.45	5.22	3.96	3.18	3.47
Básico+CCF	13.44	11.85	12.23	11.42	6.73	8.78
Básico+CCF+MM	4.74	3.49	5.89	3.55	3.21	3.87
Básico+CCF+MV	4.75	4.48	5.61	4.1	3.44	3.51
Componente de marea	M_2		M_2		S_2	

mos más información, la raíz cuadrática media definida como:

$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{2} [A_o^2 + A_a^2 - 2A_o A_m \cos(\varphi_o - \varphi_a)]} \quad (17)$$

[Marinone, 2000] tiende a disminuir conforme más datos se incluyen en los ajustes. En (17) A es la amplitud de alguna de las dos componentes de la corriente de marea y φ la fase. Los subíndices o y a se refieren a constantes obtenidas de las observaciones y de los ajustes respectivamente. Los errores de la tabla XV para el caso básico son comparables a los obtenidos por Marinone [2000], pero en su caso la comparación es con una cantidad mucho mayor de datos.

V. Conclusiones

En este trabajo se aplicó por primera vez el método de ajuste espacio-temporal desarrollado por Candela et al. [1992] a datos de un ADCP de barco en la parte norte del Golfo de California. El énfasis fue casi exclusivamente en los patrones de las mareas barotrópicas semidiurnas M_2 y S_2 . Se hicieron varios ajustes considerando datos de dos cruceros de aproximadamente 10 días de duración cada uno. Los ajustes básicos incluyeron exclusivamente estos datos y claramente el mejor resultado se obtuvo cuando se incluyeron todos los datos y se pudieron separar las dos frecuencias semidiurnas. En este ajuste básico la comparación con observaciones de ADCPs anclados arrojó buenos resultados en la parte norte pero no tan satisfactorios con las observaciones de anclajes en la parte sur.

Se incluyeron condiciones de frontera de flujo nulo normal a la costa [Carrillo et al., 2004] lo cual mejoró significativamente el patrón general de las corrientes de marea, sobre todo en regiones con pocos datos. Las condiciones de frontera también mejoraron modestamente la comparación con los datos de corriente de los anclajes.

El mejor resultado se dio cuando se incluyeron, además de los datos del ADCP del barco y las condiciones de frontera, los datos de los ADCPs anclados. En este caso hubo una mejoría significativa en la comparación con los datos de los anclajes, aunque aún en este caso hubo una subestimación de la amplitud de las corrientes en el estrecho de San Esteban (un 25 % para la M_2) en donde se encuentran las corrientes más fuertes.

Se observó que la fase de las corrientes semidiurnas aumenta de norte a sur en la región de las Islas. Esto es contrario al comportamiento de la fase de la elevación que

aumenta de sur a norte. El valor mas realista es de unos 10° (unos 20 minutos) y podría deberse a fenómenos locales en los que la onda de marea se ajusta a las condiciones de cambios bruscos en la batimetría y la línea de costa. Asimismo, este aumento de fase de las corrientes hacia el sur podría estar relacionado a la disminución del desfase entre corrientes y elevación que pase de unos 90° en la parte norte (corrientes hacia la cabeza antecediendo a la máxima elevación) a unos 70° en la parte sur.

Se extendió el método para incluir constantes armónicas de la elevación utilizando la ecuación de continuidad y de esa manera obtener mapas cotidales de la elevación. Estos mapas resultaron bastante realistas aún en regiones sin datos y resaltan el hecho de que las constantes armónicas de la elevación se pueden aproximar mediante funciones relativamente sencillas y de escalas mas grandes. Se hicieron ajustes a la velocidad promedio en la vertical y al transporte. Los mejores ajustes fueron a la velocidad promediada en la vertical.

Se estimó el transporte a través de tres estrechos entre la península e Isla Tiburón debido a las mareas semidiurnas M_2 y S_2 . El transporte total fué de 10.8 Sv , arrojando un prisma de mareas para región al norte de los estrechos considerados de $1.51 \times 10^{11} \text{ m}^3$ y un campo de elevación promedio de 1.67 m en mareas vivas. Los valores obtenidos muestran que el mayor transporte se dá entre la península e Isla San Lorenzo. Aunque es posible que el transporte en el estrecho de San Esteban esté un poco subestimado debido a la subestimación de la amplitud en esa zona, no se cree que dicha subestimación sea suficiente para compensar el mayor transporte que se da en la sección pegada a la península y que tiene un área un 40% mayor que la del estrecho de San Esteban.

Claramente el método ha arrojado resultados aceptables y es de suponerse que las estimaciones de las corrientes de marea podrían mejorar y extenderse al resto del golfo conforme se cuente con una base de datos con mayor cobertura temporal y espacial.

Apendice A1. Componentes de las elipses de los ajustes a la corriente de marea y comparación con las componentes de los anclajes.

Tabla A1.I: Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.

Ajuste básico								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.58	0.41	0.47	0.23	0.08	-0.18	-0.05	-0.03
m	-0.01	-0.01	-0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03
θ	130.02	136.85	131.41	123.49	7.04	-4.76	-8.45	-21.58
φ	225.66	273.21	278.41	212.50	4.78	43.62	43.43	-11.23
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA2}	δ_{SE2}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.56	0.50	0.43	0.30	0.06	-0.09	-0.09	0.04
m	-0.01	-0.02	-0.05	-0.01	0.01	0.00	-0.02	0.00
θ	124.44	141.34	138.84	143.01	1.46	-0.27	-1.02	-2.05
φ	224.64	231.83	232.38	221.97	3.76	2.24	-2.60	-1.76
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.55	0.49	0.52	0.23	0.05	-0.10	-0.01	-0.04
m	-0.02	-0.02	-0.06	0.01	0.00	0.00	-0.03	0.03
θ	124.43	141.97	138.51	144.11	1.45	0.35	-1.35	-0.95
φ	228.53	238.69	241.58	228.64	7.65	9.10	6.61	4.91
Ajuste con condiciones de frontera								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.46	0.42	0.49	0.30	-0.03	-0.17	-0.03	0.04
m	0.00	-0.01	-0.04	0.02	0.02	0.00	-0.01	0.03
θ	126.07	136.88	134.14	132.99	3.09	-4.74	-5.72	-12.07
φ	228.91	267.55	273.10	214.04	8.03	37.96	38.12	-9.69
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.55	0.46	0.48	0.30	0.05	-0.13	-0.05	0.04
m	-0.02	-0.03	-0.04	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.01
θ	123.95	139.65	140.87	142.71	0.97	-1.96	1.01	-2.35
φ	223.99	231.78	232.80	223.02	3.11	2.18	-2.18	-0.71
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.54	0.47	0.54	0.23	0.04	-0.12	0.01	-0.03
m	-0.02	-0.03	-0.06	0.02	0.00	-0.01	-0.02	0.03
θ	124.43	141.16	139.36	143.57	1.45	-0.45	-0.50	-1.49
φ	228.36	239.37	240.93	228.86	7.48	9.77	5.95	5.12

Nota. La combinación escogida fue $D_{est}=1$ y $D_{M2}=2$ usando datos de marzo. BA, SE, SL, DE son las iniciales del nombre de cada anclaje, Ballenas, San Esteban, San Lorenzo y Delfín respectivamente, la δ indica la diferencia del ajuste con la observación, M es el semieje mayor, m el semieje menor en m/s, θ es la inclinación y φ la fase en grados.

Tabla A1.II: Comparación de las constantes armónicas ajustadas de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.

Ajuste básico				
	San Esteban	San Lorenzo	δ_{SE2}	δ_{SL2}
M	0.40	0.36	-0.19	-0.16
m	0.00	-0.11	0.02	-0.07
θ	133.56	135.51	-8.05	-4.35
φ	256.30	252.66	26.70	17.68
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea muerta				
	San Esteban	San Lorenzo	δ_{SE2}	δ_{SL2}
M	0.50	0.42	-0.09	-0.10
m	-0.01	-0.06	0.00	-0.02
θ	138.36	141.84	-3.26	1.98
φ	233.94	227.37	4.35	-7.61
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea viva				
	San Esteban	San Lorenzo	δ_{SE2}	δ_{SL2}
M	0.48	0.51	-0.11	-0.01
m	-0.01	-0.07	0.01	-0.04
θ	139.31	140.39	-2.30	0.53
φ	238.28	238.76	8.68	3.78
Ajuste con conciciones de frontera				
	San Esteban	San Lorenzo	δ_{SE2}	δ_{SL2}
M	0.35	0.42	-0.24	-0.11
m	-0.01	-0.08	0.01	-0.05
θ	134.49	137.79	-7.13	-2.07
φ	252.49	247.17	22.90	12.20
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea muerta				
	San Esteban	San Lorenzo	δ_{SE2}	δ_{SL2}
M	0.46	0.45	-0.13	-0.07
m	-0.03	-0.04	-0.01	0.00
θ	137.62	142.14	-4.00	2.28
φ	231.37	231.32	1.78	-3.66
Ajuste con condiciones de fronterta y datos de anclajes en marea viva				
	San Esteban	San Lorenzo	δ_{SE2}	δ_{SL2}
M	0.47	0.52	-0.13	-0.01
m	-0.02	-0.06	0.00	-0.03
θ	139.96	139.65	-1.65	-0.21
φ	237.44	239.76	7.84	4.78

Nota. Igual que para la tabla A1.I, pero para los datos de mayo.

Tabla A1.III: Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.

Ajuste básico								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.43	0.35	0.35	0.27	-0.07	-0.24	-0.17	0.01
m	-0.01	-0.00	-0.06	0.01	0.01	0.016	-0.03	0.03
θ	129.99	134.1016	136.20	107.65	7.01	-7.51	-3.66	-37.41
φ	222.57	252.15	257.84	226.74	1.69	22.55	22.86	3.01
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA2}	δ_{SE2}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.54	0.47	0.42	0.35	0.05	-0.12	-0.11	0.09
m	-0.01	-0.02	-0.06	0.02	0.01	0.00	-0.02	0.03
θ	124.39	138.73	140.57	140.96	1.41	-2.88	0.71	-4.10
φ	224.43	230.83	228.32	231.09	3.55	1.23	-6.65	7.36
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.52	0.45	0.49	0.27	0.02	-0.14	-0.04	0.01
m	-0.02	-0.02	-0.07	0.02	0.00	0.00	-0.03	0.03
θ	124.38	139.30	139.89	141.62	1.40	-2.32	0.03	-3.44
φ	228.12	235.81	237.59	232.28	7.24	6.22	2.61	8.55
Ajuste con condiciones de frontera*								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.52	0.45	0.48	0.22	0.02	-0.14	-0.04	-0.05
m	-0.02	-0.02	-0.07	0.01	0.00	0.00	-0.03	0.03
θ	124.39	139.26	139.88	144.61	1.41	-2.35	0.02	-0.45
φ	228.06	235.60	238.05	231.61	7.18	6.00	3.07	7.87
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.48	0.42	0.46	0.26	-0.02	-0.17	-0.06	0.00
m	-0.02	-0.03	-0.04	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.03
θ	129.84	141.29	138.55	153.73	6.86	-0.32	-1.31	8.67
φ	224.63	229.66	229.45	228.72	3.75	0.06	-5.52	4.99
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.46	0.43	0.50	0.21	-0.03	-0.16	-0.03	-0.06
m	-0.03	-0.03	-0.05	0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.03
θ	130.11	141.20	138.62	153.93	7.13	-0.41	-1.24	8.86
φ	228.75	236.31	236.76	230.09	7.87	6.71	1.79	6.36

Nota. Igual que para la tabla A1.I, pero utilizando los datos de marzo y mayo y ajustando las frecuencias de marea M_2 , S_2 , O_1 y K_1 . * Para este ajuste se omitió la O_1 porque dió aún mejores resultados. Escencialmente los cálculos son iguales si se no se toma en cuenta la O_1 , a excepción del marcado con asterisco.

Tabla A1.IV: Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la S_2 en las coordenadas de los anclajes.

Ajuste básico								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.36	0.15	0.16	0.13	0.07	-0.17	-0.12	-0.02
m	-0.10	0.02	-0.02	0.08	-0.09	0.04	0.00	0.09
θ	130.61	137.14	131.91	117.36	6.97	-5.51	-8.36	-28.05
φ	195.16	164.56	158.97	210.53	16.88	-17.92	-30.08	21.19
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA2}	δ_{SE2}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.32	0.29	0.36	0.16	0.03	-0.03	0.08	0.01
m	0.00	-0.01	-0.04	0.00	0.01	0.01	-0.01	0.01
θ	125.46	141.97	137.98	139.12	1.82	-0.67	-2.30	-6.30
φ	168.48	173.95	184.30	160.09	-9.80	-8.52	-4.75	-29.26
Ajuste agregando datos de anclajes en 1 ciclo de marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.39	0.32	0.35	0.17	0.10	0.00	0.07	0.01
m	-0.01	0.00	-0.04	0.00	0.00	0.01	-0.02	0.01
θ	124.72	143.52	138.95	141.22	1.08	0.87	-1.33	-4.20
φ	181.84	180.58	187.34	170.42	3.56	-1.90	-1.71	-18.92
Ajuste con condiciones de frontera								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.15	0.16	0.18	0.12	-0.14	-0.16	-0.09	-0.03
m	0.04	0.02	0.02	-0.02	0.06	0.03	0.04	-0.01
θ	137.98	135.98	127.93	175.00	14.34	-6.66	-12.34	29.58
φ	188.00	159.78	158.74	187.40	9.72	-22.69	-30.30	-1.94
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.29	0.29	0.34	0.13	0.00	-0.03	0.07	-0.03
m	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
θ	131.18	141.66	138.39	154.51	7.54	-0.99	-1.88	9.09
φ	168.44	178.22	180.19	167.80	-9.84	-4.25	-8.86	-21.54
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	0.34	0.30	0.36	0.14	0.05	-0.02	0.08	-0.0185
m	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.0025
θ	129.81	142.37	139.93	154.12	6.17	-0.27	-0.35	8.7029
φ	180.93	182.87	184.92	176.01	2.65	0.39	-4.13	-13.3380

Nota. La combinación escogida fue $D_{est}=D_{K1}=D_{O1}$ y $D_{M2}=D_{S2}=2$ usando datos de marzo con mayo. BA, SE, SL, DE son las iniciales del nombre de cada anclaje, Ballenas, San Esteban, San Lorenzo y Delfín respectivamente, la δ indica la diferencia del ajuste con la observación, M es el semieje mayor, m el semieje menor en m/s, θ es la inclinación y φ la fase en grados.

Apendice A2. Componentes de las elipses de los ajustes al transporte y comparación con las componentes de los anclajes.

Tabla A2.1: Comparación de los parámetros armónicos ajustados de la M_2 en las coordenadas de los anclajes.

Ajuste básico								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	260.35	179.65	170.83	156.22	-54.84	-168.00	-32.41	66.02
m	-0.86	0.40	-18.11	26.07	13.48	7.34	-4.45	30.49
θ	130.93	131.89	136.95	107.39	7.95	-9.72	-2.91	-37.67
φ	249.83	246.31	241.39	213.53	28.95	16.72	6.42	-10.20
Ajuste con constantes armónicas de la elevación								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	262.14	176.93	176.41	128.09	-53.05	-170.73	-26.82	37.88
m	16.16	1.62	-9.32	-14.20	30.50	8.56	4.35	-9.78
θ	130.93	133.92	134.60	148.15	7.95	-7.69	-5.26	3.09
φ	244.04	246.48	241.89	212.73	23.16	16.89	6.91	-11.00
Ajuste con datos de anclajes en marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	343.02	256.48	183.81	101.94	27.83	-91.17	-19.43	11.74
m	-6.17	-11.32	-21.04	-1.97	8.17	-4.38	-7.37	2.45
θ	124.42	138.52	140.39	143.56	1.44	-3.10	0.53	-1.50
φ	224.82	230.50	227.31	223.58	3.94	0.91	-7.67	-0.15
Ajuste con datos de anclajes en marea muerta y ajuste de elevación								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	344.37	249.58	189.04	98.64	29.18	-98.07	-14.20	8.44
m	4.39	-10.03	-18.76	-13.03	18.72	-3.09	-5.10	-8.61
θ	128.06	137.02	140.46	132.65	5.07	-4.60	0.60	-12.41
φ	224.72	230.09	228.17	224.44	3.84	0.49	-6.81	0.70
Ajuste con datos de anclajes en marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	326.42	242.78	209.08	79.79	11.23	-104.88	5.84	-10.41
m	-12.27	-10.04	-24.83	5.42	2.07	-3.10	-11.16	9.85
θ	124.40	139.11	140.08	144.79	1.42	-2.51	0.22	-0.27
φ	228.74	235.27	235.62	230.00	7.86	5.67	0.64	6.27
Ajuste con datos de anclajes en marea viva y ajuste de elevación								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	327.76	236.30	213.50	76.84	12.57	-111.35	10.27	-13.36
m	1.05	-10.59	-21.45	-7.07	15.39	-3.66	-7.78	-2.65
θ	128.03	137.38	140.64	131.21	5.05	-4.23	0.78	-13.85
φ	228.65	234.68	236.40	230.22	7.77	5.08	1.43	6.49

Nota. La combinación escogida fue $D_{est}=DK_1=DO_1$ y $D_{M_2}=DS_2=2$ usando datos de marzo. BA, SE, SL, DE son las iniciales del nombre de cada anclaje, Ballenas, San Esteban, San Lorenzo y Delfín respectivamente, la δ indica la diferencia del ajuste con la observación, M es el semieje mayor, m el semieje menor en m^2/s , θ es la inclinación y φ la fase en grados.

Continuación de la tabla A2.1.

Ajuste con condiciones de frontera								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	262.78	174.40	177.65	134.63	-52.41	-173.26	-25.59	44.43
m	1.90	-5.89	-12.19	-4.35	16.24	1.05	1.48	0.07
θ	131.27	131.83	138.20	105.09	8.29	-9.79	-1.66	-39.97
φ	244.54	246.40	241.96	178.93	23.66	16.81	6.98	-44.80
Ajuste con condiciones de frontera y ajuste de elevación								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	246.49	170.51	186.77	63.50	-68.70	-177.14	-16.47	-26.70
m	11.40	0.92	-7.16	-26.75	25.74	7.86	6.51	-22.33
θ	128.87	133.54	135.63	113.74	5.88	-8.07	-4.23	-31.32
φ	237.13	245.62	242.72	249.34	16.25	16.03	7.74	25.61
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea muerta								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	340.61	230.81	208.72	99.98	25.42	-116.85	5.49	9.78
m	-7.95	-14.49	-16.11	0.48	6.39	-7.55	-2.45	4.91
θ	124.84	135.38	142.88	141.84	1.85	-6.23	3.02	-3.22
φ	224.83	231.93	226.91	224.55	3.95	2.33	-8.07	0.82
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea muerta y ajuste de elevación								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	340.10	215.77	220.87	103.70	24.91	-131.88	17.64	13.50
m	1.34	-11.89	-15.33	-11.62	15.68	-4.95	-1.67	-7.20
θ	129.11	137.00	140.39	129.21	6.13	-4.62	0.53	-15.85
φ	225.10	230.39	228.17	225.96	4.22	0.79	-6.80	2.23
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea viva								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	323.09	222.14	229.68	79.81	7.90	-125.51	26.44	-10.39
m	-10.20	-11.97	-23.51	5.85	4.14	-5.04	-9.85	10.27
θ	124.70	136.59	142.07	142.94	1.72	-5.02	2.21	-2.12
φ	229.31	237.40	233.25	228.85	8.43	7.80	-1.73	5.12
Ajuste con condiciones de frontera y datos de anclajes en marea viva y ajuste de elevación								
	BA	SE	SL	DE	δ_{BA1}	δ_{SE1}	δ_{SL1}	δ_{DE}
M	321.34	211.54	238.85	83.50	6.15	-136.11	35.62	-6.71
m	1.10	-12.77	-16.22	-7.65	15.44	-5.83	-2.55	-3.22
θ	128.84	137.56	140.33	128.54	5.86	-4.06	0.47	-16.52
φ	229.93	236.23	233.53	229.75	9.05	6.63	-1.45	6.02

Referencias

- Argote, M.A., A. Amador y M.F. Lavin. 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 100:103-118 p.
- Badan-Dangon, A., C. Hendershott y M.F. Lavín. 1991. Underway Doppler Current Profiles in the Gulf of California. *American Geophysical Union*, 2(19): 217-218 p.
- Badan-Dangon, A. 1991. Coastal Circulation From the Galapagos to the Gulf of California. *The Sea*, 11: 315-343 p.
- Bray, N.A. 1988. Thermohaline Circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93: 9223-9240 p.
- Candela, J., C.R. Beardley y R. Limerburner. 1992. Separation of Tidal and Subtidal Currents in Ship-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Observations. *Journal of Geophysical Research*, 97(C1): 769-788 p.
- Carrillo, L., A.J. Souza, A.E. Hill, J. Brown, L. Fernand y J. Candela. 2004. Detiding ADCP data in a highly variable shelf sea: The Celtic sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22:84-97 p.
- Filonov, E.A. y M.A. Lavín. 2003. Internal tides in the Northern Gulf of California. *Geophys. Res.*, 108(C5): 3151-3166 p.
- Gacía-Górriz, E., J. Font y J. Candela. 1997. Data Quality Control for Vessel Mounted

Acoustic Doppler Current Profiler. Application for the Western Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 61(4): 417-430 p.

García Silva, G. y S.G. Marinone. 2000. Caracterización dinámica y energética de la marea en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 323-353 p.

Godin, G. 1998. *Tides*, CICESE, Ensenada B.C., México. 290 pp.

Godín, G. 1984. Frictional damping of the tide in the gulf of California. *Geofísica Internacional*, 24(2): 295-313 p.

Gutiérrez, G. y R. Morales. 1986. Revisión de los datos de mareas para el Golfo de California, Informe Técnico OC-85-03, CICESE, Ensenada B.C., México.

Jiménez, A. 2003. Análisis de las corrientes de marea y series de temperatura en la parte norte del Golfo de California. Tesis de Maestría, Ensenada B.C., México. 84 pp.

López, M. y J. García. 2003. Moored observations in the northern, Gulf of California: A strong bottom current. *Journal of Geophysical Research*. 108(C2): 3048-3063 p.

Marinone, S.G. 2000. Corrientes de marea en el Golfo de California: intercomparaciones entre modelos bidimensionales y tridimensionales con observaciones. *Ciencias Marinas* 26(2), 275-301 p.

Marinone, S.G. 1997. Tidal residual currents in the Gulf of California: Is the M_2 Tidal constituent sufficient to induce them?, *Journal of Geophysical Research*. 102(C4):

8611-8623 p.

Mellor, L. G. 1994. *Introduction to Physical Oceanography*, Princeton University, Princeton, New Jersey, 196-211 pp.

Morales Pérez, R.A. y G. Gutierrez de Velazco. 1989. Mareas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, 28: 25-46 p.

Salas, J.J. 1996. El intercambio de agua sobre los umbrales del Golfo de California, Tesis de Maestría, Ensenada B.C., México. 62 pp.

Transect User's Manual for Narrowband Acoustic Doppler Current Profilers. 1993. RD Instruments, 0855 Businesspark Ave, San Diego California 92131.