

TESIS DEFENDIDA POR

Lilia Margarita Flores Mateos

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Juan Manuel López Mariscal

Director del Comité

Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra

Miembro del Comité

Dr. Julio Candela Pérez

Miembro del Comité

Dr. Rubén Castro Valdez

Miembro del Comité

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

Miembro del Comité

Dr. Jesús Manuel Figueroa Rodríguez

*Coordinador del programa de
posgrado en Oceanografía Física*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

2 de Junio del 2010

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



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

**CORRIENTES DE MAREA BAROTRÓPICAS Y BAROCLÍNICAS EN
LOS UMBRALES DEL GOLFO DE CALIFORNIA**

TESIS

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

Presenta:

LILIA MARGARITA FLORES MATEOS

Ensenada, Baja California, México, 2 de Junio del 2010

RESUMEN de la tesis de **LILIA MARGARITA FLORES MATEOS**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFÍA FÍSICA. Ensenada, Baja California. 2 de Junio del 2010.

CORRIENTES DE MAREA BAROTRÓPICAS Y BAROCLÍNICAS EN LOS UMBRALES DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Resumen aprobado por:

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Director de Tesis

Se presenta la estructura vertical y la variación temporal de las corrientes de marea en los umbrales de la parte norte del Golfo de California. La estructura vertical indica diferencias significativas entre los cuatro umbrales estudiados. Analizando el semieje mayor de la elipse de marea, se encuentra que el umbral San Esteban (SE), es el más energético y presenta una importante intensificación del armónico de marea M_2 cerca del fondo, mientras que en Canal de Ballenas (CB) se presenta cerca de la superficie. En el umbral San Lorenzo (SL), las mayores velocidades se encuentran a media agua y además muestra una importante reducción de la fase cerca del fondo, esta última característica, es compartida por Delfín (DE), el umbral menos energético. En todos los umbrales las corrientes baroclínicas de marea son importantes, especialmente cerca del fondo y en algunos casos, cerca de la superficie. Éstas parecen ser responsables de la estructura vertical de las corrientes observadas debido a que intensifican o debilitan a la corriente observada dependiendo si están o no, en fase con la corriente barotrópica.

Con demodulación compleja, se encontró una relación importante entre la corriente de baja frecuencia y la evolución temporal de la corriente de marea en SL y DE, umbrales donde se presenta una corriente de baja frecuencia importante cerca del fondo que se desborda hacia el fondo de las cuencas ubicadas al *NW* de los umbrales. Éstos resultados muestran que la intensificación de la corriente de baja frecuencia está correlacionada con una reducción de la amplitud y fase de la corriente de marea semidiurna en SL, y únicamente reducción de la fase en DE. Por otro lado, el umbral CB presenta una modulación por parte de la corriente de baja frecuencia en la amplitud, cerca de la superficie, y en la fase, cerca del fondo.

Las fluctuaciones de temperatura y las corrientes de marea a la frecuencia semidiurna están 90° fuera de fase en el fondo de SL y casi en fase en el fondo de SE. Esto se interpreta como advección de agua fría y caliente durante el flujo y reflujos del ciclo de marea en SL, mientras que en SE el comportamiento es más consistente con movimientos verticales de las isotermas.

Palabras Clave: Corrientes de marea, umbrales, Golfo de California, elipses de marea y demodulación compleja.

ABSTRACT of the thesis presented by **LILIA MARGARITA FLORES MATEOS**, in partial fulfillment of the requirements of the degree of MASTER OF SCIENCE in PHYSICAL OCEANOGRAPHY. Ensenada, Baja California. June 2nd, 2010.

**BAROTROPIC AND BAROCLINIC TIDAL CURRENTS AT THE
NORTHERN SILLS OF THE GULF OF CALIFORNIA**

The vertical structure and time variability of tidal currents at the sills of the northern Gulf of California are presented. The vertical structure shows significant differences among the four sills studied. The semimajor axis of the tidal ellipse shows that San Esteban (SE), the most energetic sill, has an important intensification of the M_2 tide near the bottom, while Ballenas Channel (BC) has the largest amplitudes near the surface. The San Lorenzo (SL) sill shows largest amplitudes at mid water, and an important reduction in phase towards the bottom. This latter feature is also present at Delfin (DE) sill, the least energetic sill studied. In all sills baroclinic tidal currents are important, especially near the bottom and in some cases near the surface. Baroclinic currents appear to be responsible for the observed vertical structure since they increase or decrease the tidal current depending on the phase difference with the barotropic current.

Complex demodulation of tidal currents at SL and DE sills shows an important relation between the low-frequency current and the time evolution of the amplitude and phase of the tidal currents. Both SL and DE sills have a strong near-bottom low-frequency currents which overflow downslope into the *NW* basins of these sills. Results show that an intensification of the low-frequency currents is correlated with a reduction of the M_2 tidal current amplitude and phase at the SL sill, and just with a phase reduction at the DE sill. On the other hand, the CB sill shows a modulation of the tidal amplitude near the surface and of the tidal phase near the bottom by the low-frequency current.

Semidiurnal temperature and current fluctuations at the bottom of the SL sill are 90° out of phase. Whereas at the bottom of the SE sill, these fluctuations are almost in phase. At the SL sill this is interpreted as advection of cold and warm water during the flood and ebb of the tidal cycle, respectively, whereas at the SE sill the behavior is more consistent with vertical movement of the isotherms.

Keywords: Tidal Currents, sills, Gulf of California, tidal ellipse and complex demodulation.

Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo mi cariño a mis padres Tomás Flores Chohula y Marina Mateos Luna, mis hermanos Ulises y Ruth, y mi familia.

Agradecimientos

La primera persona a quien deseo expresar mi gratitud es a Manuel López. Esta investigación dio frutos gracias a su asesoría. El compromiso con su labor académica así como la libertad que me brindó para explorar el tema, son cosas que cualquier estudiante quisiera tener.

Extiendo mi agradecimiento a los miembros del comité de tesis: Alejandro, Julio, Rúben, y Gilberto, quienes siempre han mantenido la puerta abierta. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido sobremanera este trabajo.

No se como devolver el apoyo de Modesto Ortiz, Luis Ochoa, Julio Sheinbaum, Paula Pérez, Luis Zavala, Oscar Velasco, Manuel Figueroa, Victor Gódinez, Teresa Cavazos, Miguel Lavín y Pedro Osuna durante mi formación en el posgrado.

Agradezco al grupo *CANEK*, a los colaboradores de los proyectos *TURBO* y *BTS*, así como a la tripulación de los buques Justo Sierra y Francisco de Ulloa, por introducirme en el atrayente mundo de la oceanografía física observacional, a través de los cruceros en el golfo de México, Mar Caribe, golfo de California y Bahía de Todos Santos Ens.

Gracias por la disposición y apoyo de Lupita Pacheco, Lina Zúñiga, Mónica Sánchez, Lupita Rodríguez, Tania Bonilla y Alina Morales, su trabajo ha facilitado sin duda alguna nuestra labor en el posgrado.

Quisiera agradecer a mis compañeros del posgrado, su diaria convivencia es alentadora: Cesar Coronado, Fernando Andrade, Gino Passalacqua, Laura Flores, Felipe Gómez, Héctor García, Guillermo Díaz, Efraín Mateos, Diego de Dios, Dennise Castro, Manuel Verduzco, Cuahtémoc Turrent, Sarahí Arriaga, Heriberto Vazquez, Rita Guevara, Alejandro Kurczyn, Diego Pantoja, Jorge Montes, Audrey Vadillo, Nicolas kolodziejczyk, Enric Pallas, Erika Sandoval, Rubén Villarreal, Julio Martínez, Renzo Wittembury y Gerardo Rosario- Jessica.

Finalmente expreso mi gratitud, a aquellas personas que no solo han cruzado por mi camino, si no que se han quedado en el: Gabriela Colorado, Vladimir Toro, Angélica Romero, Sol Gil, Bertha Aguirre, Miguel Tenreiro, Pamela De Grau, Eduardo Quijano, Luis E. Miranda. Last but not least, Marciano, Lennon, Mir, Leonardo Tenorio y Maximo García.

Esta investigación fue posible gracias al esfuerzo del pueblo Mexicano a través de una beca de maestría (No. Registro 225753) brindada por CONACYT. Y además, a las becas atentamente otorgadas por el Departamento de Oceanografía Física del CICESE (No. Folios 13431, 13942 y 14034).

fil

Contenido

Resumen en español	i
Resumen en inglés	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xii
I. Introducción	1
I.1 Área de estudio	2
I.2 Antecedentes	3
I.2.1 Datos	8
II. Metodología	11
II.1 Procesamiento preliminar	11
II.2 Métodos de análisis de datos	12
II.2.1 Análisis armónico	12
II.2.2 Demodulación compleja	14
III. Resultados	18
III.1 Análisis armónico	18
III.1.1 Corrientes observadas	18
III.1.2 Corrientes barotrópicas y presión subsuperficial	26
III.1.3 Corrientes baroclínicas	28
III.2 Demodulación compleja	35
III.2.1 Demodulación compleja en San Lorenzo	35
III.2.2 Demodulación compleja en Delfín	41
III.2.3 Demodulación compleja en Canal de Ballenas	43
III.3 Variaciones de la temperatura cerca del fondo	46
IV. Discusión	49
V. Conclusiones	62
Literatura citada	65
A. Demodulación compleja clásica	68

B. Períodos de observación	71
C. Armónicos de la corriente de marea	73

Índice de figuras

1	Mapa mostrando el área de estudio y la ubicación de instrumentos, anclajes (círculos rojos) y sensores de presión subsuperficial (círculos verdes).	2
2	Diagrama mostrando la distribución temporal de los datos. ADCP se refiere a mediciones de velocidad, MCATS a mediciones de temperatura y conductividad. PRES indica mediciones de presión subsuperficial. Los acrónimos se explican en la sección I.1	9
3	(a) Eje mayor de las elipses de marea para los armónicos más importantes correspondientes al tercer período del umbral SE. (b) Razones de señal a ruido correspondientes a los ocho armónicos analizados en (a). (c) Acercamiento de (b) para los armónicos con la razón más pequeña.	19
4	Parámetros de las elipses de marea M_2 de las corrientes observadas y barotrópicas (diamante) para los tres períodos de observación analizados en SL. Los colores verde, negro y magenta corresponden al primer, segundo y tercer período, respectivamente. El asterisco en las etiquetas indica la presencia de un corrientímetro cerca del fondo.	20
5	Parámetros de las elipses de marea de las corrientes observadas y barotrópicas (diamante) para el armónico M_2 en los cuatro umbrales. El número arábigo indica el período de observación y el asterisco la presencia de un corrientímetro cerca del fondo. La línea roja de la tercera gráfica indica la inclinación aproximada del GC que es de 125°	21
6	Parámetros de las elipses de marea para el armónico M_4 en los umbrales SE y SL. El asterisco indica la presencia de un corrientímetro cerca del fondo .	24
7	Parámetros de las elipses de marea de la corriente baroclínica para el armónico M_2 . El significado de los números en el recuadro y la línea roja en la inclinación son los mismos que en la figura 5.	29
8	Contornos de la razón, entre la amplitud de la corriente para una frecuencia de marea y la amplitud de la corriente barotrópica, como función de $A_{u'}/A_U$ y $\phi_{u'} - \phi_U$, véase ecuación 18.	31
9	Razón de los ejes mayores de la corriente observada y las amplitudes de la componente barotrópica (primera columna); diferencia de fase entre la corriente baroclínica y barotrópica (segunda columna); y razón de amplitudes entre la corriente baroclínica y barotrópica (tercera columna), para el armónico M_2 . Las amplitudes y fases de la corriente barotrópica y baroclínica, corresponden a la componente paralela al eje mayor de la corriente observada. Las líneas punteadas así como los círculos rojos y negros indican: el intervalo comprendido entre $\pm 100^\circ$ y los datos correspondientes al máximo y al mínimo valor de la corriente observada, respectivamente.	32

10	Razones de varianzas entre la predicción de las corrientes de marea y las corrientes observadas.(a) Predicción de corrientes observadas y barotrópicas; (b) predicción de corrientes baroclínicas (b).	34
11	Correlación entre la corriente de baja frecuencia y los parámetros obtenidos con el método de demodulación compleja para una frecuencia: DCF (a), y el método de demodulación compleja con admitancia: DCA, (b). En el umbral SL-03, para el armónico M_2 y la banda semidiurna, respectivamente. Los cuadrados (círculos) indican correlación entre la fase (amplitud) de la demodulación compleja y la serie de baja frecuencia.	36
12	Serie de (a) la amplitud y (b) la fase obtenidos con la demodulación compleja con admitancia (rojo) para la banda semidiurna en SL-03. La serie en azul de (a) y (b) corresponde a la corriente de baja frecuencia (U_{BF}), sus valores positivos indican flujo hacia la cabeza del golfo. Todas las series corresponden a 52 m PEF y presentan una correlación (r) de -0.5.	37
13	Coherencias y fases correspondientes a las series que aparecen en la figura 12. La línea roja en las coherencias indica el valor mínimo significativamente distinto de cero con un 95% de confianza.	37
14	(a) Corriente promedio paralela al golfo (146°). A partir de la componente de maxima varianza de la corriente, se calculó la amplitud (a) y fase (b) de la corriente observada y barotrópica para M_2 en el umbral SL-03.	38
15	Correlación de la amplitud y fase de la demodulación compleja de la banda cuartidiurna, con la corriente de baja frecuencia en SL-03(a). (b) es igual que (a) de la figura 14 pero para el armónico de marea M_4	39
16	Igual que la figura 15, pero para la banda semidiurna de las corrientes baroclínicas y el armónico de marea M_2	40
17	Amplitud de la demodulación compleja de la corriente baroclínica (roja) y corriente de baja frecuencia (azul) a la profundidad en que ambas tienen la máxima correlación. (b) Igual que (a) pero para la fase de la demodulación compleja (roja).	41
18	Coherencias y fases, correspondientes a las series que aparecen en la figura 17.	42
19	En rojo, ϕ_{DC} obtenida con demodulación compleja para la banda semidiurna de la corriente observada. En azul serie de baja frecuencia. Ambas calculadas a 35 m PEF en el umbral DE.	42
20	Coherencia y fase para las series de la figura 19	43
21	Correlación de la amplitud y fase de la demodulación compleja de la banda semidiurna de la corriente observada, con la corriente de baja frecuencia en CB-05 (a). Corriente promedio paralela al golfo (130°), así como amplitudes (b) y fases (c) de la componente M_2 de la corriente observada y barotrópica para la componente de maxima varianza de la corriente.	44
22	En rojo, ϕ_{DC} obtenido con demodulación compleja para la banda semidiurna de la corriente observada. En azul, serie de baja frecuencia. Ambas calculadas a 40 m PEF en el umbral CB-05	45
23	Coherencias y fases correspondientes a las series presentadas en la figura 22.	45

24	En rojo, la amplitud A_{DC} obtenida con demodulación compleja para la banda semidiurna de la corriente observada y en azul la corriente de BF. Ambas calculadas a 470 m PEF en el umbral CB-05.	45
25	Coherencias y fases correspondientes a las series presentadas en la figura 24 .	46
26	(a) Segmento de aproximadamente 15 días de la serie de velocidad (componente de máxima varianza, orientada a 144° respecto al Este) y la temperatura en SL-03. Esta última, esta desplazada tres horas a la izquierda. Ambas series están a 8 m PEF, los valores positivos y negativos de la velocidad indican flujo y reflujos de la marea, respectivamente. (b) Función de correlación indicando el desfase correspondiente a la correlación máxima de ambas series.	47
27	Igual a la figura 26, pero en SE-03, donde la componente de máxima varianza esta orientada a 154° respecto al Este) y la temperatura esta desplazada una hora a la izquierda. (a) Ambas series a ~ 35 m PEF . (b) Función de correlación correspondiente	48
28	(a) Eje mayor de las corrientes observadas en SL-03 y de un ajuste a una capa de Ekman con coeficiente de intercambio turbulento (A_v) constante e igual $0.14 \text{ m}^2/\text{s}$. (b) Igual que (a) pero para la fase y con un $A_v = 0.03 \text{ m}^2/\text{s}$.	52
29	(a) Perfiles verticales horarios de la corriente observada durante mareas vivas e intensa corriente de baja frecuencia. Los números corresponden a las trece horas que tarda un ciclo semidiurno de la M_2 , las horas uno y siete corresponden al reflujos y flujos de la marea, respectivamente. Las velocidades > 0 indican un flujo con dirección a la cabeza del golfo y viceversa. (b) Perfiles verticales de marea a la hora siete, para distintas condiciones de marea y corriente de baja frecuencia. MV indica marea viva, MM marea muerta y U_{BF-I} corriente de baja-frecuencia intensa.	53
30	Flujo promedio paralelo al golfo de la corriente, este se encuentra rotado $137, 146, 130$ y 125° respecto al Este en los umbrales SE, SL, CB y DE, respectivamente. Velocidades positivas (negativas) indican un flujo hacia la cabeza (boca) del golfo	57
31	Series de tiempo del número de Richardson grafico en escala logaritmica a distintas profundidades. (a) Serie cercana al fondo con valores de $Ri \leq 1/4 = 1052$, (b) serie en zona de mayor corte vertical valores de $Ri \leq 1/4 = 646$ y (c) serie más somera con valores de $Ri \leq 1/4 = 0$, los valores por debajo de la línea roja son menores a $1/4$	58
32	(a) Número de Richardson a 40 m por encima del fondo como función de las fluctuaciones de la corriente (corriente sin la media) a esa misma profundidad. El promedio y la mediana, se refieren a los valores asociados a las fluctuaciones positivas y negativas. La línea verde marca el valor $Ri = 1/4$ (b) Igual que (a) pero para el cuadrado de la frecuencia de Brunt-Vaisala.	59
33	Temperatura longitudinal a lo largo de los umbrales SL (a) y SE (b). Estas secciones están orientadas de SE a NW y corresponden a un día de mayo del 2003 (28-29 de mayo en el caso de SL).	59

34	(a) Temperatura a lo largo del umbral de SL. Todos los puntos son el promedio de los 10 valores mas cercanos a la profundidad del umbral, aproximadamente 400 m (b) Igual que (a) pero para el umbral de SE a una profundidad aproximada de 600 m.	60
35	Demodulación compleja de la componente de máxima varianza de la corriente barotrópica en SL-03, usando los tres métodos. DCA demodula la banda semidiurna, mientras DCC y DCF demodulan la frecuencia M_2 . (a) Amplitud y (b) fase, de la demodulación compleja.	69
36	Demodulación compleja de las componentes de la corriente barotrópica en SL-03, orientadas hacia sus ejes principales. Amplitud de la DC para la componente de máxima (a) y mínima (b) varianza.	70
37	Igual que la figura anterior, pero para la diferencia de fase de la componente de (a) máxima y (b) mínima varianza.	70
38	Parámetros de las elipses de las corrientes observadas y barotrópicas para los periodos de observación analizados en el umbral CB. El asterisco indica la presencia de instrumento de fondo.	71
39	Al igual que la figura anterior pero para el umbral SE.	72
40	(a) Eje mayor de las elipses de marea para los armónicos más intensos, de cada banda de frecuencia, correspondientes al umbral SL-03. (b) Razones de señal a ruido correspondientes a los ocho armónicos analizados. (c) Acercamiento de (b) para los armónicos con la razón más pequeña.)	73
41	Igual que la figura 40, pero para el umbral CB-05.	74
42	Igual que la figura 40, pero para el umbral DE.	75

Índice de tablas

I	Periodos analizados con AA en cada uno de los anclajes instalados en los umbrales del archipiélago del NGC. El asterisco indica periodos de observación común entre correntímetros de fondo y ADCP. Las fechas están en dd/mm/aa.	10
II	Parámetros de las elipses de marea durante los períodos observados (número junto al acrónimos del umbral) en umbrales del norte y del sur del archipiélago. El asterisco (*) indica la presencia de un corrientímetro cerca del fondo. . .	26
III	Parámetros del análisis armónico de la presión subsuperficial, durante los períodos observados en seis localidades. Las siglas significan: CB-AG canal de Ballenas del lado de la isla, CB-BC canal de Ballenas del lado de la península, SF-San Francisquito, SL-San Lorenzo, SE-San Esteban y TI-Tiburón.	27
IV	Diferencia de fases entre la presión subsuperficial y corrientes barotrópicas para el armónico M_2 en los cuatro umbrales.	28
V	Análisis armónico de la corriente de marea observada y la temperatura en los umbrales SL-03 y SE-03, así como el desfase entre el valor máximo de la corriente y mínimo de la temperatura (horas). Las series analizadas corresponden a las más próximas al fondo en cada umbral.	48
VI	Velocidades de fase y longitudes de onda de la marea baroclínica, para distintos cruceros en el año	50
VII	Valores máximos y mínimos para M_2 de M_{OBS}/A_{BAR} , así como diferencias de fase $\phi_{BAR} - \phi_{BCL}$, razones A_{BCL}/A_{BAR} , y distancias por encima del fondo, correspondientes.	54

I

Introducción

El perfeccionamiento continuo de las observaciones oceanográficas ha contribuido al progreso de la oceanografía y como consecuencia a la comprensión del mar. El mejoramiento en la toma de datos inició con la incursión de la tecnología del radar y el sonar en las labores oceanográficas hace 60 años. La navegación más certera así como la localización de instrumentos sumergidos mediante señales acústicas (Cartwright, 1999), repercurtió en el desarrollo de técnicas de navegación y rastreo, que han sido usadas para sumergir, localizar y recuperar aparatos científicos del fondo marino. Este hecho, significó un parteaguas en la oceanografía física; el resultado exitoso fue el registro de series temporales de diferentes variables físicas (e.g. velocidad, temperatura, salinidad y presión) de manera independiente al científico.

Los registros de velocidad y otras variables dentro del mar hoy en día, se pueden obtener de un arreglo de aparatos sujetos a un ancla. El aumento de la flotabilidad mediante boyas permite a los aparatos tener una estructura vertical. El mecanismo liberador que une al arreglo de aparatos con el ancla, al ser activado mediante una señal acústica suelta el ancla. Una vez liberados, los aparatos flotan hacia la superficie para posteriormente ser recuperados por la tripulación del barco. A la estructura básica de aparatos, boyas, mecanismo liberador y ancla se le conoce como anclaje.

En el caso de la marea, los registros eulerianos de corrientes obtenidos en los 70's, mostraron amplitudes mayores a las que predice la teoría de la corriente barotrópica, así como fases que variaban con la profundidad. Dichas observaciones hicieron que se retomara el estudio de las mareas baroclínicas antes conocidas como *ondas fronterizas de marea* (Cartwright, 1999); observadas por primeras vez por Nansen y Helland en el mar Noruego pero descritas desde 1907 por Petterson O. (Wunsch, 1975). El caso anterior es un ejemplo de que el conocimiento y la comprensión de los fenómenos físicos depende del

desarrollo teórico y tecnológico.

En este trabajo utilizamos observaciones de corrientes y temperatura para describir y, en cierta medida, explicar la estructura vertical de las corrientes de marea observadas en los umbrales de la parte norte del Golfo de California. Los datos *in situ* utilizados en esta tesis fueron obtenidos de anclajes, ubicados en la Región de las Grandes Islas (RGI) en la parte Norte del Golfo de California (NGC), México.

I.1 Área de estudio

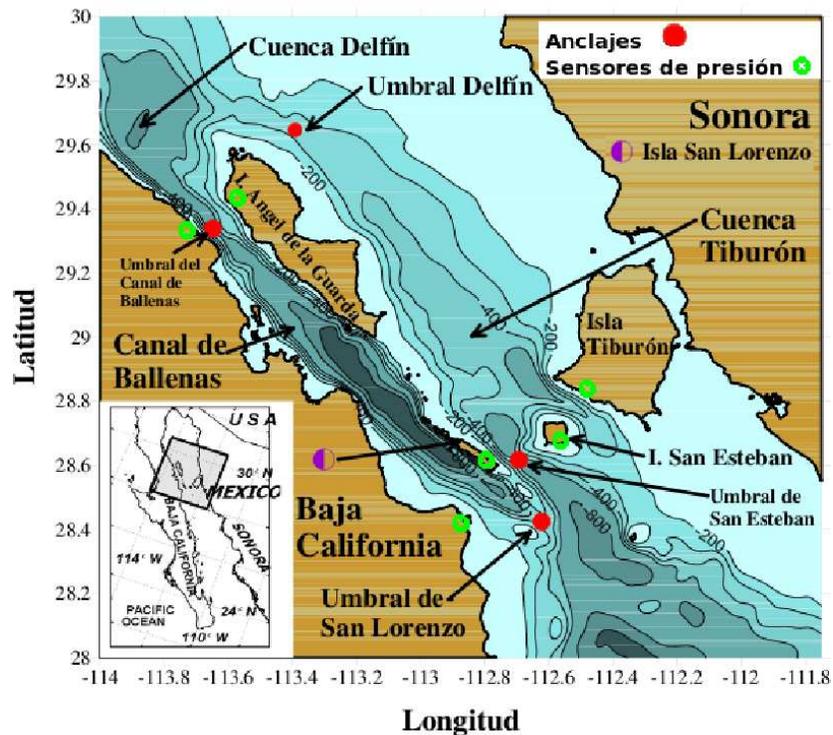


Figura 1. Mapa mostrando el área de estudio y la ubicación de instrumentos, anclajes (círculos rojos) y sensores de presión subsuperficial (círculos verdes).

El área de estudio está ubicada entre las latitudes 28° a $30^{\circ}N$ y entre las longitudes 112° a $114^{\circ}W$. Esta región inicia, topográfica y oceanográficamente, en los estrechos y umbrales (zonas de menor profundidad que separan cuencas) que se encuentran entre las islas Tiburón, San Esteban, San Lorenzo y al sureste de esta última isla, cerca de las costas de Baja California (ver figura 1). La profundidad en la zona de estudio decrece

considerablemente respecto a las cuencas localizadas inmediatamente al sur, llamadas San Pedro Mártir y Guaymas, pero después vuelve a aumentar en las cuencas profundas de la RGI, particularmente en la cuenca del Canal de Ballenas, la cual alcanza hasta 1600 m de profundidad. Los grandes cambios de profundidad y la presencia de estrechos e islas, hacen que las corrientes de marea se intensifiquen significativamente.

Fue en los umbrales más importantes y profundos de la región del NGC donde se hicieron las observaciones de corrientes utilizadas en este trabajo. Los umbrales en la parte norte del archipiélago son el del Canal de Ballenas (CB) y Delfín (DE), con profundidades aproximadas de 600 y 360 m, respectivamente. El primero corresponde al extremo norte de la cuenca Canal de Ballenas y el segundo se ubica en el canal submarino que conecta a las cuencas Delfín y Tiburón, las cuales tienen profundidades máximas de 800 y 440 m, respectivamente. Al sur se encuentran los umbrales San Lorenzo (SL) y San Esteban (SE) con aproximadamente 400 y 600 m de profundidad, respectivamente. SL está en el extremo sur del Canal de Ballenas al suroeste de la isla con el mismo nombre, y SE se sitúa entre las islas de San Lorenzo y San Esteban.

I.2 Antecedentes

Los estudios previos de los que ha sido objeto el GC, nos permiten conocer aspectos oceanográficos a escala interanual, estacional y de mesoescala. Recientemente se han iniciado estudios también de microestructura.

Mediante observaciones y modelación numérica se ha encontrado un vínculo muy importante entre el GC y el Océano Pacífico, siendo éste el forzante principal de las mareas por cooscilación, de la circulación estacional, de la variación del nivel del mar y de la termodinámica en el Golfo de California (GC) (Lavín *et al.*, 1997; Lavín y Marinone, 2003). La longitud del golfo, casi en resonancia con la banda de frecuencia de los armónicos semidiurnos de marea, propicia los altos valores energéticos del armónico M_2 (frecuencia semidiurna lunar) en el NGC (Morales y Gutiérrez, 1989; Argote *et al.*, 1995; Marinone, 1997; Filonov y Lavín, 2003; Jiménez Lagunes, 2003). Como consecuencia, el rango de

marea se amplifica por un factor de cinco en el extremo noroccidental del golfo respecto a la parte colindante con el Océano Pacífico, mientras que el rango mínimo de marea tiene lugar en la parte central. Estos dos extremos del GC son referidos en la literatura como cabeza y boca del golfo, respectivamente. Empleando modelos numéricos y observaciones, se ha encontrado una alineación de la corriente de marea barotrópica con el eje longitudinal del golfo (Argote *et al.*, 1995; Jiménez Lagunes, 2003). Así que la componente de velocidad paralela al golfo describe muy bien el flujo y reflujos de la marea.

En el NGC, la fuerte disipación de la energía de marea por fricción de fondo, es atribuida principalmente a la banda de frecuencia semidiurna. El valor más reciente, calculado para la constituyente M_2 fue obtenido numéricamente y es de $3.14 \times 10^9 \text{ W/m}^2$ (Marinone, 1997), el cual es del mismo orden que el obtenido a partir de observaciones por Filloux (1973). Esta disipación da como resultado que la propagación de una onda incidente sea reflejada con menor amplitud debido a una pérdida de energía por efecto de la fricción de fondo. Por esta razón el punto anfidrómico en el golfo se ve desplazado hasta ubicarse virtualmente sobre la península a la altura de Santa Rosalía, localidad ubicada a media península (Marinone y Lavín, 1997). El NGC presenta una circulación tipo estuario, propiciada por la ganancia de calor anual y la evaporación presente, las cuales incrementan la salinidad y densidad de las aguas superficiales. Sin embargo, la ganancia de calor es suficiente para mantener aguas relativamente salinas y menos densas en la superficie. Esta ganancia de flotación de las aguas superficiales se propone como la causa principal de la circulación en el NGC (Bray, 1988).

El archipiélago es de gran interés por la intensificación de la marea semidiurna así como la presencia de regiones con temperaturas superficiales relativamente bajas, alta productividad biológica y una batimetría compleja. Éste lugar se caracteriza por tener umbrales someros (400 a 600 m) que conectan cuencas relativamente profundas (400 a 1600 m). En la parte sur se ubican los umbrales de San Lorenzo, San Esteban y Tiburón con 400, 600 y menos de 300 m de profundidad, respectivamente. Se ha encontrado que a través de los dos primeros se introduce agua profunda a la parte norte del golfo, en el caso del umbral Tiburón no existen mediciones. Los flujos profundos a través de los umbrales

San Lorenzo (SL) y San Esteban (SE) hacia las cuencas canal de Ballenas y Tiburón, respectivamente, no están conectados por debajo de los 200 m (ver figura 1). Aunque el valor estimado del transporte es de aproximadamente 0.09 Sv en ambos umbrales, ($1 \text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), se encuentran relacionados a fenómenos distintos. En el umbral SE se registran las corrientes de marea más intensas de la zona, estas corrientes, aunadas a la ausencia de una cuenca más profunda de dimension apreciable al NW de SE, hacen que el transporte de agua profunda sea por bombeo de marea. Por otro lado, en el umbral SL existe una corriente media cerca del fondo con valores máximos de 0.3 m/s. Esta corriente de densidad transporta agua desde el umbral, hasta las profundidades de casi 1600 m en la cuenca Canal de Ballenas, fluyendo por las grandes pendientes que conectan al umbral con la parte más profunda del canal (López *et al.*, 2008).

El flujo de las corrientes profundas sobre las pendientes tan pronunciadas de los umbrales SL y DE, producen durante su descenso hacia las cuencas del Canal de Ballenas y Delfín, respectivamente, una mezcla entre las aguas profundas y las capas superiores. Como resultado, el agua cerca del fondo en estas dos cuencas esta bien mezclada y es de menor densidad que el agua sobre los mismos umbrales y en las cuencas que se encuentran al sur de ellos. Por ejemplo, en la cuenca Delfín la densidad a 800 m de profundidad es ligeramente menor que en el fondo de la cuenca Tiburón con 500 m (López *et al.*, 2008). Las correlaciones negativas entre las fuertes corrientes de fondo con la temperatura, en las cuencas Delfín y Canal de Ballenas cuyas velocidades promedio son 17 y 33 cm/s, respectivamente, indican que la entrada de agua a las cuencas corresponde a agua más fría y densa conocida como Agua Subsuperficial Subtropical (ASS) proveniente de la parte sur del golfo y originada en el Océano Pacífico (López *et al.*, 2008). El vigoroso afloramiento con velocidades verticales de aproximadamente 4.6 m/d, calculado para el agua profunda convergente en el fondo de las cuencas Delfín y Canal de Ballenas, fluye cerca de la superficie de manera divergente. La velocidad media en la parte norte del Canal de Ballenas, para el agua que sale superficialmente de la cuenca es de 0.2 m/s (López *et al.*, 2006). Estos hechos, aunados al corto periodo de residencia de las aguas en ambas cuencas (148 días), es considerado el mecanismo de transformación de agua ASS en Agua del

Golfo de California (AGC). Las recientes investigaciones hechas en el archipiélago, señalan la importancia de las corrientes profundas de baja frecuencia en la zona y explican las condiciones homogéneas de las aguas profundas en la parte norte del GC. Anteriormente, dichas condiciones habían sido atribuidas únicamente a la mezcla por mareas, mediante fricción de fondo, saltos hidráulicos y rompimiento de ondas internas (Argote *et al.*, 1995; Marinone y Lavín, 2003; Paden *et al.*, 1991).

Dada la importancia de las mareas en el GC, en los últimos años se han hecho estudios en la zona del archipiélago, para conocer el comportamiento de la corriente barotrópica así como la estructura vertical de la corriente de marea. A partir de las observaciones de Jiménez Lagunes (2003) y Lino Pérez (2004) en el umbral DE y lugares aledaños, sabemos que existe un desfase de aproximadamente 90° entre las corrientes de marea barotrópica y la presión subsuperficial en el umbral Delfín, sin embargo dicho desfase se reduce a unos 70° en los umbrales de SL y SE. Que la corriente de marea anteceda al nivel del mar 90° es consistente con la estructura de una onda estacionaria que teóricamente describe la propagación de la marea en el GC (Hendershott y Speranza, 1971). El estudio de los patrones de la marea barotrópica semidiurna, en el NGC hecho por Lino Pérez (2004) con mapas cotidales, sugiere que la propagación de la marea barotrópica concuerda con una onda de Kelvin incidente y reflejada. Los mapas se obtuvieron a partir de constantes armónicas del nivel del mar y datos de corrientímetros (uno de ellos montado en un barco y otros anclados en los umbrales). Además, calculó un transporte total hacia el NGC de 10.8 Sv del cual, la mayor parte entra por la sección entre la península de Baja California y la isla San Lorenzo. El volumen de agua estimado que mueve la marea en ésta zona (prisma de marea) es de $1.51 \times 10^{11} \text{ m}^3$.

Respecto a las corrientes de marea observadas, se sabe que las frecuencias diurnas en el NGC son débiles a diferencia de las semidiurnas (Jiménez Lagunes, 2003; Filonov y Lavín, 2003). Un modelo baroclínico tridimensional pudo reproducir el efecto de la banda semidiurna así como las velocidades máximas de las corrientes localizadas en el archipiélago (Marinone, S.G. and M.F. Lavín, 2005). Éste modelo obtuvo que las corrientes barotrópicas son más energéticas que las baroclínicas. Los armónicos con mayor energía cinética para la

corriente barotrópica son M_2 , seguida por los armónicos semianual solar (Ssa), semidiurno principalmente solar (S_2) y anual solar (Sa), en el caso de la corriente baroclínica los niveles de energía para M_2 , Ssa y Sa son similares. El estudio de la estructura vertical de la corriente de marea en DE para un periodo de 118 días (Julio-Octubre, 1997) hecho por (Jiménez Lagunes, 2003) indica, que para M_2 la inclinación y la fase de la corriente observada cerca del fondo tienden a aumentar, contrario al comportamiento de la corriente de marea en presencia de una capa de Ekman. Además se observó que cerca de la superficie, las amplitudes de la corriente baroclínica eran máximas y las amplitudes de la corriente observada eran mayores a la amplitud de la corriente barotrópica, mientras que cerca del fondo, también existen altas amplitudes de la corriente baroclínica pero la corriente observada presenta valores menores a los de la corriente barotrópica. Jiménez Lagunes (2003) sugiere que las corrientes baroclínicas tienden a aumentar y disminuir la amplitud de la corriente barotrópica cerca de la superficie y fondo, respectivamente.

El análisis de demodulación compleja hecho a los parámetros de la elipse de las corrientes de marea observadas y baroclínicas en DE por Jiménez Lagunes (2003), indican que el viento no produce variaciones temporales apreciables, en cambio la corriente de baja frecuencia que fluye en el fondo del umbral DE con dirección a la cuenca Delfín si (López y García, 2003).

Para conocer el comportamiento de las ondas baroclínicas o internas, Jiménez Lagunes (2003); Filonov y Lavín (2003) estudiaron fluctuaciones verticales de la temperatura en el umbral DE y en la cuenca Tiburón, respectivamente. En esta última se ha observado la propagación de ondas internas en dirección *NW* generadas por la interacción de la corriente de marea barotrópica sobre el umbral SE. Filonov y Lavín (2003) encontraron, que en la banda cuartidurna y semidiurna dominan los desplazamientos verticales de las isotermas, los cuales presentan una variabilidad estacional. Los desplazamientos más grandes se encontraron en otoño-invierno, época en la cual ocurren primero en el fondo, sugiriendo que la propagación de energía en esta época del año es del fondo a la superficie. También estimaron que la energía de la marea interna semidiurna es 40-45% de la marea barotrópica.

Como se ha visto, las corrientes generadas por la marea en los umbrales del archipiélago del GC, son muy energéticas y contribuyen significativamente a la dinámica de la zona. La información obtenida hasta el momento respecto a las corrientes de marea esclarece parcialmente su comportamiento y además plantea nuevas interrogantes. Algunas de estas preguntas son, ¿Cómo es la estructura vertical de las corrientes en los umbrales del archipiélago?, ¿Cómo afecta la corriente baroclínica a la estructura vertical de la corriente observada?, ¿Cómo afecta la corriente de baja frecuencia a las corrientes de marea?. Aún falta investigación que nos permita conocer y comprender las corrientes de marea en la zona.

Con el objetivo de contribuir a responder estas interrogantes, este trabajo se propuso analizar la corriente barotrópica de marea así como la estructura vertical de las corrientes observadas y baroclínicas en los umbrales más importantes del NGC. Los cuales son San Esteban, San Lorenzo, Canal de Ballenas y Delfín, además, se analizó la variación temporal de las corrientes observadas y baroclínicas mediante demodulación compleja, con lo cual se pudo estudiar el efecto de las corrientes de baja frecuencia sobre las corrientes de marea.

I.2.1 Datos

Esta investigación está basada en observaciones hechas durante el proyecto UMBRALES cuyo objetivo fue conocer el intercambio de agua profunda entre la parte norte y sur del GC. Este se llevó a cabo de marzo del 2002 a septiembre del 2006 en la RGI. Los datos con los que se contaron fueron de velocidad de corrientes, presión subsuperficial, conductividad y temperatura de los cuales se trabajó principalmente con velocidades y presión subsuperficial. Las mediciones de corrientes, que comprenden prácticamente toda la columna de agua, fueron hechas con perfiladores acústicos de corrientes (ADCP, por sus siglas en inglés) instalados cerca del fondo. En ocasiones se contó con un corrientímetro por abajo del ADCP para tener mediciones a unos cuantos metros del fondo. En los anclajes con microcats (sensores que miden temperatura y conductividad), el instrumento más cercano a la superficie contó con un sensor de presión para poder monitorear el hundimiento del anclaje debido al arrastre de las corrientes.

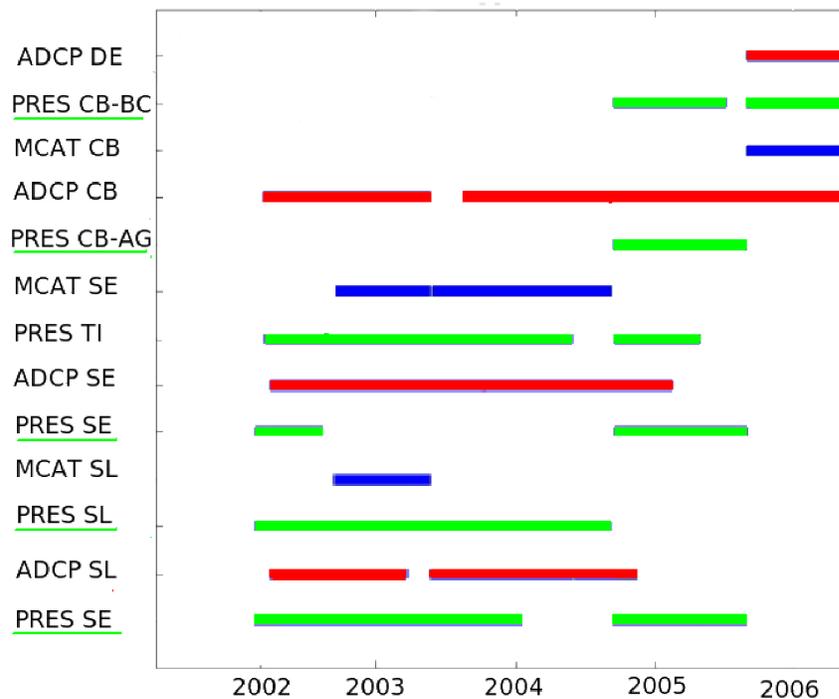


Figura 2. Diagrama mostrando la distribución temporal de los datos. ADCP se refiere a mediciones de velocidad, MCATS a mediciones de temperatura y conductividad. PRES indica mediciones de presión subsuperficial. Los acrónimos se explican en la sección I.1

Las series observadas con ADCP, como puede verse en la figura 2, tienen una duración promedio de 300 días. Sin embargo, la longitud de las series analizadas disminuyó ligeramente cuando se consideraron los períodos simultáneos de ADCP y corrientímetros de fondo. Así por ejemplo, la longitud de las series en el umbral SL puede variar desde 137 hasta 547 días. La longitud en días de las series de corriente, estudiadas con análisis armónico durante los distintos periodos de observación, aparecen en la tabla 1.

Los datos de presión subsuperficial se obtuvieron con sensores de presión instalados a poca profundidad (entre 5 y 20 metros), la longitud de dichas series puede verse en la figura 2. Estas mediciones nos permitieron obtener una buena estimación de las variaciones del nivel del mar producidas por la marea. Los seis sensores de presión subsuperficial se localizan sobre las islas y la península de Baja California, ver la figura 1. Al norte de la cuenca Canal de Ballenas se ubican dos, uno de lado de la Isla Ángel de la Guarda (PRES CB-AG) y otro del lado de la Península de Baja California (PRES CB-BC); al sur cuatro más: Tiburón (PRES TI), San Esteban (PRES SE), San Lorenzo (PRES SL) y San

Tabla I. Periodos analizados con AA en cada uno de los anclajes instalados en los umbrales del archipiélago del NGC. El asterisco indica periodos de observación común entre correntímetros de fondo y ADCP. Las fechas están en dd/mm/aa.

Umbral	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
<i>SE</i>	136 días 27/03/02- 10/08/02	393 días * 11/08/02- 31/05/03	425 días * 26/05/03- 24/07/04		
<i>SL</i>	137 días 26/03/02- 10/08/02	219 días * 11/08/02- 19/03/03	547 días * 22/05/03- 19/11/04		
<i>CB</i>	155 días 08/03/02- 09/08/02	283 días * 10/08/02- 20/05/03	130 días * 09/08/03- 18/12/03	350 días 12/09/04- 27/08/05	392 días 29/08/05- 26/09/06
<i>DE</i>	390 días * 28/08/05- 23/09/06				

Francisquito (PRES SF). Al referirnos a los datos de presión subsuperficial omitiremos el prefijo PRES.

En el siguiente capítulo se describe la metodología utilizada para el análisis de datos, posteriormente en el capítulo III se describen los resultados, y se discuten sus implicaciones en el capítulo IV. Finalmente, en el capítulo V se presentan las conclusiones de esta investigación y además se proponen algunas recomendaciones que podrían dar pauta a investigaciones posteriores.

:

II

Metodología

II.1 Procesamiento preliminar

El análisis de corrientes se realizó a partir de series horarias obtenidas de los datos crudos. Estos fueron tomados usando perfiladores acústicos de corriente (conocidos por sus siglas en inglés como ADCP que viene de Acoustic Doppler Current Profiler). Los perfiladores utilizados en los umbrales SE, DE y CB, fueron de 75 kHz registrando observaciones cada 30 minutos; en el caso de SL, el perfilador empleado fue de 150 kHz con observaciones horarias. Se redujeron las observaciones de cada 30 minutos a observaciones horarias con un filtro Lanczos, eliminando con ello las frecuencias mayores a 0.5 ciclos por hora (cph). Esta es la frecuencia de corte, conocida como frecuencia de Nyquist, para series horarias.

La información de los corrientímetros RCM-11 (AANDERAA) y Argonauta (Sontek) se registraron cada hora, esta información se pudo usar directamente para construir las series horarias. Se realizó un análisis sobre las series horarias derivadas de los datos originales (en lo sucesivo corrientes observadas), también se estimaron series horarias de corrientes barotrópicas y baroclínicas. Definiéndose las corrientes barotrópicas como el promedio vertical de la corriente,

$$\vec{U}(t) = \frac{1}{z_f - z_0} \left[\int_{z_0}^{z_f} \vec{u}(t, z) dz \right], \quad (1)$$

donde $\vec{U}(t)$ es la corriente barotrópica y $\vec{u}(t, z)$ son las corrientes observadas. Las corrientes baroclínicas se estimaron como la diferencia entre las corrientes observadas y las corrientes barotrópicas,

$$\vec{w}'(t, z) = \vec{u}(t, z) - \vec{U}(t). \quad (2)$$

II.2 Métodos de análisis de datos

A continuación, se describen los métodos de análisis empleados para estudiar la estructura vertical y la variación temporal de las corrientes de marea, así como el contexto en el que fueron utilizados.

II.2.1 Análisis armónico

El análisis armónico constituye una buena herramienta para estimar la amplitud y fase del nivel del mar y de la corriente de marea. Esto es particularmente cierto en el NGC donde la señal de marea constituye una gran parte de la varianza del nivel del mar y de las corrientes. El análisis armónico es un método estándar de análisis de corriente y nivel del mar, utilizado para obtener la amplitud y la fase de las diferentes componentes de marea (Candela Perez, 1982; Godin, 1988; Emery y Thomson, 2001). El análisis armónico se realizó utilizando el paquete de programas **t_tide** escrito en lenguaje de matlab (Pawlowicz *et al.*, 2002). En esta sección nos limitaremos a explicar como se obtienen los parámetros de la elipse de la corriente de marea a partir de las amplitudes y fases del vector de corrientes (Jiménez Lagunes, 2003; Prandle, 1982). Las componentes armónicas de la corriente, para la constituyente de marea con frecuencia ω_k son

$$u_k = A \cos(\omega_k t - a) \quad y \quad v_k = B \cos(\omega_k t - b), \quad (3)$$

donde u_k y v_k son las componentes Este y Norte, A y B las amplitudes, y a , b las fases de las componentes de la corriente. Introduciendo la notación de un vector complejo, tenemos que el vector velocidad de la corriente de marea en cualquier instante viene dado por

$$w_k = u_k + iv_k. \quad (4)$$

Para facilitar el estudio de la estructura de las corrientes, es conveniente dividir al vector velocidad en la suma de dos movimientos circulares, uno que rota en sentido horario (en dirección de las manecillas del reloj) y otra que rota en sentido contrario. Para ello consideramos

$$\cos(\omega_k t - a) = \frac{e^{i(\omega_k t - a)} + e^{-i(\omega_k t - a)}}{2},$$

introduciendo esta expresión en (3) y (4) podemos escribir el vector w_k como

$$w_k = W_k e^{i\omega_k t} + W_{-k} e^{-i\omega_k t}, \quad (5)$$

donde W_k y W_{-k} estan dados por

$$W_k = \left[\frac{Ae^{-ia} + iBe^{-ib}}{2} \right] \quad y \quad W_{-k} = \left[\frac{Ae^{ia} + iBe^{ib}}{2} \right] \quad (6)$$

y $W_k e^{i\omega_k t}$ y $W_{-k} e^{-i\omega_k t}$ son vectores complejos de magnitud constante que describen círculos de radios $|W_k|$ y $|W_{-k}|$ con sentidos de giro positivo (contrario a las manecillas del reloj) y negativo (en el sentido de las manecillas del reloj), respectivamente. Ambos círculos son descritos en el mismo periodo $2\pi/\omega_k$. A la ecuación (5) se le conoce como la representación polarizada de las corrientes (Godin, 1988). Los parámetros de la elipse se obtienen escribiendo (5) como

$$w_k = |W_k| e^{i\omega_k t} e^{i\phi_1} + |W_{-k}| e^{-i\omega_k t} e^{i\phi_2}. \quad (7)$$

Si reescribimos ϕ_1 y ϕ_2 como

$$\phi_1 = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}, \quad \phi_2 = -\frac{\phi_1 - \phi_2}{2} + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2},$$

al sustituir en la ecuación (7) podemos escribir w_k como

$$w_k = [(|W_k| + |W_{-k}|) \cos(\omega_k t - \Phi) + i(|W_k| - |W_{-k}|) \sin(\omega_k t - \Phi)] e^{i\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}}, \quad (8)$$

donde $\Phi = (\phi_2 - \phi_1)/2$. La ecuación anterior define una elipse de semieje mayor $M = |W_k| + |W_{-k}|$, semieje menor $|m| = ||W_k| - |W_{-k}||$, inclinación $\theta = (\phi_1 + \phi_2)/2$ y fase Φ . El valor máximo de la corriente está dado por M y se alcanza al tiempo $t_o = \Phi/\omega_k$, en ese momento el vector de corriente tiene una inclinación θ . El vector w_k correspondiente a la frecuencia ω_k describe una elipse en el periodo $2\pi/\omega_k$ y el sentido de rotación está dado por el signo de m . Si $m > 0$ ($m < 0$) el vector rota positivamente (negativamente). De esta manera el vector de la corriente de marea correspondiente a la frecuencia ω_k queda completamente descrito por los cuatro parámetros M , m , θ y Φ . En términos de estos parámetros se puede escribir el vector w_k como

$$w_k = [M \cos(\omega_k t - \Phi) + im \sin(\omega_k t - \Phi)] e^{i\theta}. \quad (9)$$

Dado que la corriente de marea se compone de la suma de los armónicos de marea, la corriente total puede representarse como

$$W = \sum_{k=1}^N w_k. \quad (10)$$

En el caso del campo escalar de la presión subsuperficial el análisis armónico únicamente produce amplitud y fase para cada una de las frecuencias de marea que se puedan resolver.

II.2.2 Demodulación compleja

La variación temporal de las constantes armónicas (amplitud y fase) de alguna frecuencia presente en una serie de tiempo, puede ser estudiada con la demodulación compleja (DC). Esto se hace analizando la evolución temporal de dos parámetros que indican la variación de la amplitud, y la fase de las corrientes. Nos referiremos a ellos como amplitud (A_{DC}) y fase (Φ_{DC}) de la demodulación compleja. Estos valores corresponden a una razón de amplitud y diferencia de fase, las cuales se obtiene al comparar la DC de la amplitud y la fase con la DC de la amplitud y fase de una serie de referencia. Se supone que la amplitud y la fase de las series de referencia no varían con el tiempo y representan un promedio de estas cantidades durante toda la serie. En general, la serie de referencia es la predicción de marea para la cual la amplitud y fase de cada armónico de marea son constantes. Por lo tanto, un valor unitario de A_{DC} y nulo de Φ_{DC} indican que las amplitudes y fases no varían.

Tres métodos de demodulación compleja (DC) fueron aplicados a las series de tiempo con el propósito de compararlos y escoger el que mejor describiera la variación temporal de los parámetros (amplitud y fase) de la marea. La característica principal de los diferentes métodos consiste en el dominio en que demodulan a la serie. Dos de ellos, el método de demodulación compleja clásica (DCC) y el de demodulación compleja para una sola frecuencia (DCF), demodulan la serie de una frecuencia específica en el dominio del tiempo. Mientras que el tercero, demodulación compleja con admitancia (DCA), aborda a la serie en el dominio de la frecuencia. A continuación se describen los métodos DCA y DCF, que fueron los que mejor resolvieron la variación temporal de la corriente. La descripción y

desventaja por la cual se descartó del método DCC se presenta en el apéndice A.

Demodulación compleja con admitancia

La demodulación compleja basada en el análisis de admitancia (DCA) es un método espectral (en el dominio de la frecuencia) que demodula una banda de frecuencia y se basa en lo que se conoce como función de admitancia o de transferencia (Candela Perez, 1982). Dicha función es el cociente entre el espectro cruzado de dos series, conocidas en la literatura como de entrada y salida, y el autoespectro de la serie de entrada.

La DCA considera como serie de entrada la predicción de la marea, ya sea el nivel del mar o corriente, y como serie de salida, la serie observada correspondiente. Por lo tanto podemos escribir la función de admitancia como

$$\xi(f) = \frac{\mathcal{S}_{po}}{\mathcal{S}_{pp}} = A_{DC}(f)e^{i\Phi_{DC}(f)} \quad (11)$$

donde \mathcal{S}_{po} es el espectro cruzado entre la serie de la predicción y la serie observada, \mathcal{S}_{pp} es el autoespectro de la serie de la predicción, $A_{DC}(f)$ es la magnitud de la función de admitancia y $\Phi_{DC}(f)$ la fase. $A_{DC}(f)$ se puede interpretar como el cociente entre la amplitud de la serie observada y la amplitud de la predicción. Mientras que $\Phi_{DC}(f)$ es la diferencia de fase entre la serie de la predicción y la serie observada.

Para que este método constituya una demodulación compleja, se aplica la DCA a segmentos consecutivos de la serie, los cuales son relativamente cortos (15 días, para éste trabajo) comparados con la longitud total de la serie (300 días en promedio), pero relativamente largos en comparación con el período que se quiere analizar con la demodulación (e.g. 0.5 días para M_2). Al aplicar el análisis de admitancia a segmentos consecutivos, se obtiene una serie de tiempo de $A_{DC}(f)$ y otra de $\Phi_{DC}(f)$ cuyas longitudes corresponden al número de segmentos analizados.

En principio, la amplitud y fase de la serie de la predicción se consideran constantes y representativas de la amplitud y fase “promedio” de toda la serie de tiempo. Por lo tanto, la serie de $A_{DC}(f)$ representa el cociente de la amplitud de la marea (nivel del mar o corriente) y la amplitud promedio para los diferentes segmentos analizados; mientras que

$\Phi_{DC}(f)$ representa la diferencia de fases entre la fase promedio de la predicción y la fase de la serie observada, la cual varía en el tiempo. Es importante reiterar que $A_{DC}(f)$ y $\Phi_{DC}(f)$ son funciones del tiempo para una cierta frecuencia, aunque no se indique explícitamente esta dependencia.

La resolución del espectro cruzado y el autoespectro es de un ciclo por día, la cual es una resolución baja en frecuencia, pero permite mayor confiabilidad estadística al promediar un mayor número de bandas. Con ésta resolución las mareas diurnas, semidiurnas y cuartidiurnas quedan en la segunda, tercera y quinta banda de la función de transferencia para cada segmento.

Demodulación compleja para una frecuencia

Este método, que denotamos por DCF se basa en demodular una serie de tiempo que contiene únicamente la frecuencia de nuestro interés y está basado en el trabajo de Bruno *et al.* (1999a). Para obtener la serie de tiempo con una sola frecuencia, f_o , a la serie observada se le resta su predicción utilizando todas las frecuencias, excepto la frecuencia de marea f_o que queremos demodular. La serie que se demodula se puede representar como

$$U_{f_o}(t) = u(t) - U_{p-f_o}(t) \quad (12)$$

donde $u(t)$ es la serie observada, $U_{p-f_o}(t)$ es la predicción de la serie observada pero sin incluir la frecuencia f_o . Por lo tanto $U_{f_o}(t)$ se puede considerar como el residuo, más la componente de marea con frecuencia f_o . Dado que la predicción se hace con las amplitudes y fases del análisis armónico sobre toda la serie de tiempo, las variaciones temporales de amplitud y de fase de la componente con frecuencia f_o , deben quedar contenidas en $U_{f_o}(t)$. La demodulación de $U_{f_o}(t)$ se realiza de la forma clásica (Bloomfield, 2000), la cual se explica brevemente a continuación.

La demodulación consiste en multiplicar $U_{f_o}(t)$ por el parámetro $e^{-i2\pi f_o t}$. En el dominio de la frecuencia, esto equivale a desplazar la transformada de Fourier (TF) de $U_{f_o}(t)$ a la izquierda un valor f_o . Con este desplazamiento, el valor de la TF de $U_{f_o}(t)$ a la frecuencia f_o queda en el origen de las frecuencias ($f = 0$) y la podemos aislar con un filtro paso bajo.

Simbólicamente podemos representar la demodulación como

$$\mathcal{B}(t) = U_{f_o}(t)e^{-i2\pi f_o t} * h(t) \quad (13)$$

donde $h(t)$ representa un filtro paso bajo y el asterisco la operación de convolución. En el presente trabajo se utilizó un filtro Lanczos de 361 pesos con una frecuencia de corte de 0.01 cph. Hay que resaltar que $\mathcal{B}(t)$ es una cantidad compleja y por consecuencia, con amplitud y fase.

Finalmente, se divide la amplitud de la serie demodulada $B(t)$ entre la amplitud de la componente de marea de frecuencia f_o obtenida con análisis armónico de toda la serie; y a la fase de $B(t)$ se le resta la fase correspondiente. Simbólicamente tenemos

$$A_{DC-2} = \frac{|\mathcal{B}(t)|}{A_0} \quad \text{y} \quad \Phi_{DC-2} = \alpha(t) - \Phi_0 \quad (14)$$

donde A_0 y Φ_0 son las amplitudes y fases obtenidas del analisis armónico, y $\alpha(t)$ es la fase de $B(t)$. Así que la amplitud y fase de la demodulación compleja, $A_{DC-2}(t; f_0)$ y $\Phi_{DC-2}(t; f_0)$, corresponden a la razón de amplitudes obtenidas de la demodulación y el análisis armónico, así como a la diferencia entre la fase de la demodulación y el análisis armónico, respectivamente.

III

Resultados

El capítulo III se divide en tres secciones, en ellas se describen los resultados más importantes de la presente investigación. En la primera, se exponen los resultados correspondientes al análisis armónico (AA) hecho a las series de velocidad de las corrientes (CM) tomadas en los cuatro umbrales de estudio y a los datos de presión subsuperficial de seis localidades ubicadas en el archipiélago. Con dichos parámetros se describió la corriente barotrópica así como la estructura vertical de las corrientes observadas y baroclínicas. La segunda sección concierne a resultados de la demodulación compleja (DC) hecha a la componente de máxima variabilidad de la corriente, con ella se obtuvieron A_{DC} y Φ_{DC} , parámetros con los que se estudia la variación temporal de la amplitud y fase de las corrientes observadas y en algunos casos de las corrientes baroclínicas. En la última y más corta de las secciones, se presenta un análisis de las variaciones de la temperatura cerca del fondo, principalmente en los umbrales de SL y SE.

III.1 Análisis armónico

Muchos estudios confirman que la banda semidiurna es la más energética en el GC (ver la sección I.2), sobre todo en la región del archipiélago. La frecuencia de marea más importante es la M_2 , ya que produce las variaciones de mayor amplitud en el nivel del mar y corrientes. Por ello el mayor énfasis de este trabajo es en esta constituyente.

III.1.1 Corrientes observadas

Con el propósito de analizar la estructura vertical de la marea en un amplio rango de frecuencias de marea (de cuartidiurnas a anuales), se presentan los armónicos con los valores del eje mayor (M) más altos en SE y representativos de cada banda de frecuencia,

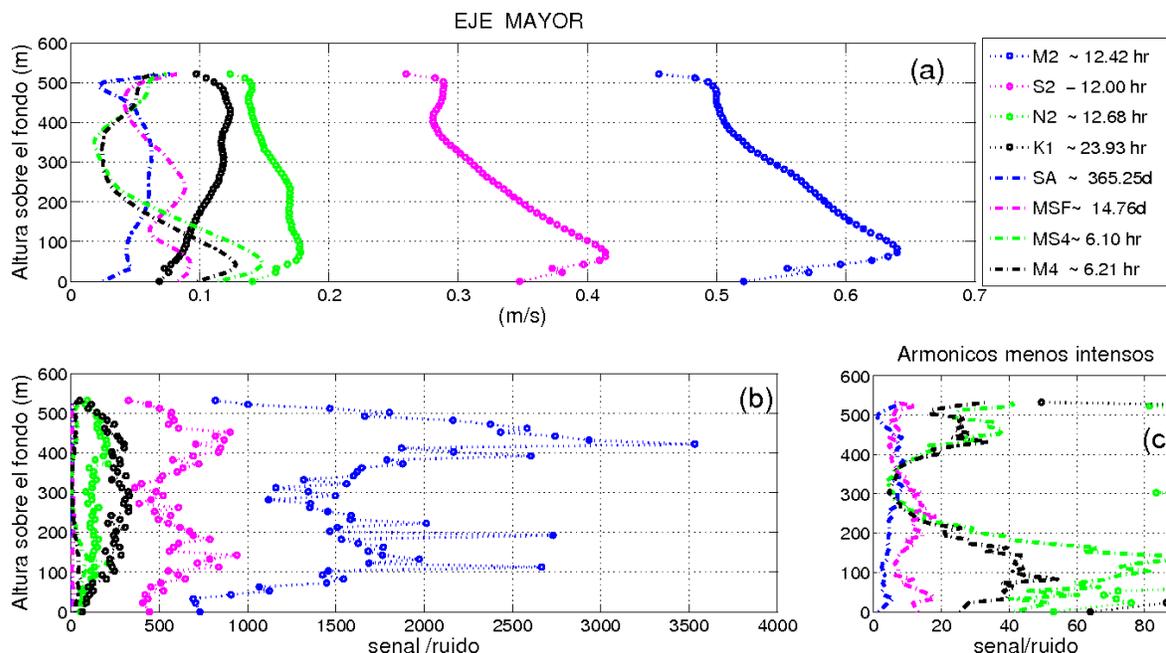


Figura 3. (a) Eje mayor de las elipses de marea para los armónicos más importantes correspondientes al tercer período del umbral SE. (b) Razones de señal a ruido correspondientes a los ocho armónicos analizados en (a). (c) Acercamiento de (b) para los armónicos con la razón más pequeña.

así como las correspondientes razones señal a ruido (RSR). La estructura vertical de M como función de la distancia al fondo en el umbral SE se presenta en la figura (3a). Se observa como la variación vertical de M depende de la profundidad y constituyente de marea. La magnitud de las frecuencias semidiurnas (M_2 , S_2 , N_2) predominan sobre la diurna (K_1), cuartidiurnas ($MS4$, M_4), quincenal (MSF) y anual (SA). Como se esperaba, M_2 presenta los valores más altos de M con velocidades máximas (0.65 m/s) en los primeros 100 m por encima del fondo. Es interesante notar que la intensificación máxima cercana al fondo sólo se presenta en las frecuencias semi-diurnas (principalmente M_2 y S_2) así como en las frecuencias cuartidiurnas que aparecen debido a la interacción no lineal de M_2 y S_2 (M_4 y $MS4$). La frecuencia quincenal MSF también presenta una moderada intensificación cerca del fondo y alrededor de 250 m por encima del fondo (PEF). La confiabilidad del armónico de marea está ligado al alto valor de RSR, la figura (3b) muestra los altos valores (≥ 500) de M_2 y S_2 así como su variación con la profundidad. Un alto valor de RSR indica que el error en la estimación de los parámetros de la elipse es pequeño y que por

lo tanto están bien determinados y son confiables (Jiménez Lagunes, 2003). La estructura vertical de M y RSR varían en cada umbral, en general se observa que luego de las bandas semidiurnas y diurnas es la banda anual la tercera en importancia en CB, DE y SL. En el caso particular de SE, los altos valores de M para las frecuencias cuartidiurnas cerca del fondo son mayores que los de K_1 (figura 3a) y además presentan relativamente altos valores de RSR. Esto puede consultarse en el apéndice C.

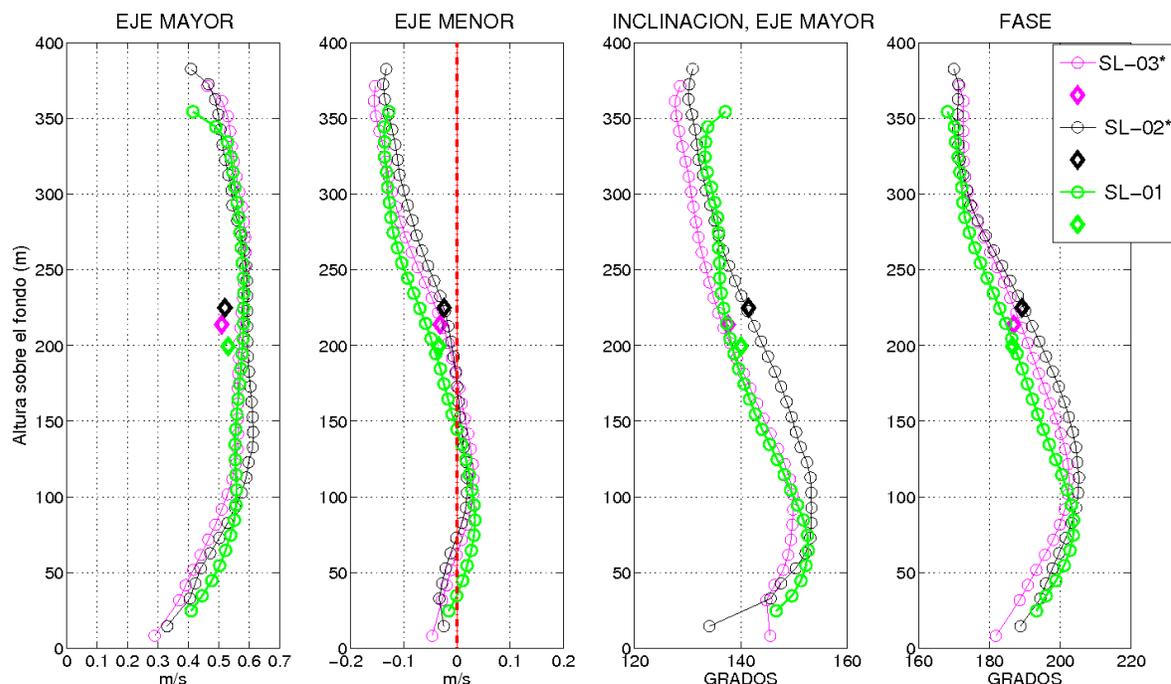


Figura 4. Parámetros de las elipses de marea M_2 de las corrientes observadas y barotrópicas (diamante) para los tres períodos de observación analizados en SL. Los colores verde, negro y magenta corresponden al primer, segundo y tercer período, respectivamente. El asterisco en las etiquetas indica la presencia de un corrientímetro cerca del fondo.

En cada umbral se registraron series de distinta longitud; como una verificación de la calidad de los datos y de la consistencia del análisis armónico, se compararon los resultados del AA para los períodos de observación analizados (véase tabla I). El caso de SL se presenta en la figura 4, como puede verse, los parámetros de la elipse de la corriente para la frecuencia M_2 son bastante similares para los tres períodos. La estructura vertical de los parámetros de la elipse para los diferentes períodos de observación en los otros umbrales pueden consultarse en el apéndice B.

A continuación se describen las características del eje mayor (M), eje menor (m),

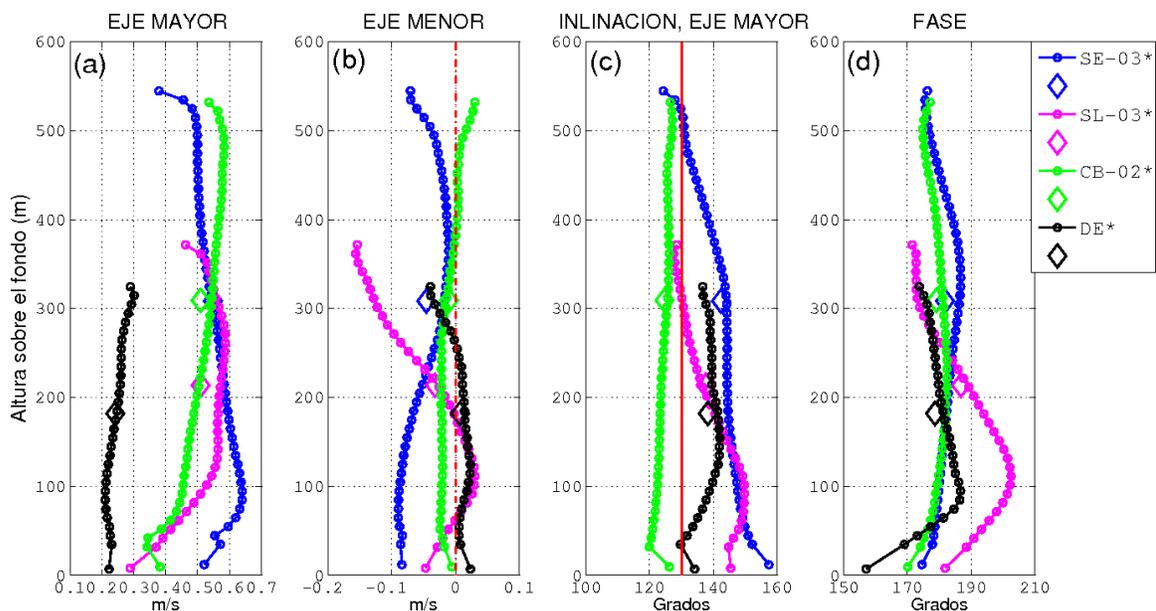


Figura 5. Parámetros de las elipses de marea de las corrientes observadas y barotrópicas (diamante) para el armónico M_2 en los cuatro umbrales. El número arábigo indica el período de observación y el asterisco la presencia de un corrientímetro cerca del fondo. La línea roja de la tercera gráfica indica la inclinación aproximada del GC que es de 125° .

inclinación (θ) y fase (Φ), calculados en SE, SL, CB y DE, para la M_2 de la corriente observada y barotrópica (figura 5). Los períodos de la corriente que se presentan aunque no simultáneos, todos son mayores a 280 días. Las variaciones de la estructura vertical, de los parámetros de la corriente observada se describirán a partir del punto más cercano al fondo. La gráfica del eje mayor de las corrientes observadas y barotrópicas (figura 5a) indica que las velocidades de mayor magnitud fueron registradas en SE, CB y SL. La estructura vertical, en cambio, señala que la profundidad de las máximas amplitudes de M son particulares en cada umbral.

En el caso de SE se registra un valor de M de 0.52 m/s cerca del fondo que se incrementa hasta alcanzar el valor máximo de 0.65 m/s a 80 m PEF. Es interesante notar que los valores mínimos registrados se encuentran cerca de la superficie con velocidades de 0.45 m/s. La estructura vertical en CB es opuesta, los valores más pequeños fueron registrados en las primeras celdas del ADCP (~ 0.33 m/s) y aumentan paulatinamente hasta alcanzar los valores más altos de casi 0.60 m/s cerca de la superficie. En el umbral SL se da el aumento mas grande del eje mayor, los pequeños valores cerca del fondo, 0.29 m/s, aumentan a \sim

0.58 m/s a unos 250 m PEF. Estos valores permanecen casi constantes hasta unos 300 m PEF y posteriormente decrecen a 0.46 m/s cerca de la superficie. En el umbral DE se encuentran los valores más bajos de los cuatro umbrales estudiados. En los primeros 100 m hay valores ~ 0.20 m/s que aumentan gradualmente hasta casi 0.30 m/s cerca de la superficie.

Los valores del eje menor tienen valores típicamente menores a 0.1 m/s (figura 5b) y oscilan entre negativos y positivos en tres de los cuatro umbrales. Esta variación en la vertical indica un cambio en el sentido de rotación del vector de velocidad a ciertas profundidades. Los valores de $m < 0$ indican un sentido de rotación en el sentido de las manecillas del reloj (horario), el cual es de esperarse en el hemisferio norte para aguas profundas y alejadas de la costa (Marinone y Lavín, 1997). Los valores de $m > 0$ indican un sentido opuesto. En SE, m presenta las mayores velocidades negativas cerca del fondo, -0.09 m/s, que decrecen hasta -0.01 m/s a 300-400 m PEF, para luego volver a aumentar cerca la superficie. Éste umbral es el único que no presenta un cambio en el sentido de rotación. CB mantiene valores de m prácticamente constantes de -0.03 m/s, en los primeros 300 m excepto en el punto mas cercano al fondo; a los 400 m PEF cambia de signo m y toma valores positivos, ésto indica que la corriente superficial gira en direccion anti-horaria y en sentido contrario a la corriente profunda. Sólo SL presenta un doble cambio de sentido de rotación en la vertical, el valor de m del punto mas cercano al fondo es de -0.05 m/s y se hace cero a 50 m, donde m se incrementa gradualmente hasta tomar valores de 0.03 m/s para después decrecer y cambiar de sentido cerca de los 200 m PEF. Por encima de esta profundidad, m sigue disminuyendo hasta alcanzar el valor negativo mas alto de -0.15 m/s. DE presenta el mayor valor positivo de m cerca del fondo, con 0.02 m/s y cambia de sentido a 260 m para alcanzar valores en la superficie de hasta -0.04 cm/s.

El tercer parámetro a considerar es la inclinación del eje mayor, θ , cuyo valor es respecto al Este. La inclinación de la corriente barotrópica en los umbrales varía poco, aproximadamente 120 - 140°, y se encuentra casi alineada con el eje del GC (Argote *et al.*, 1995), sin embargo, la variación vertical que presenta θ es mayor. En la figura 5c, se observa que la inclinación del punto mas cercano al fondo en SE es de 157° y este valor disminuye

gradualmente hasta orientarse con el eje del golfo cerca de la superficie. La inclinación en el umbral CB varía muy poco con la profundidad, así que θ está muy bien alineada con el eje del golfo a todas las profundidades. Esta inclinación, casi constante, podría deberse a que CB es el único umbral que está propiamente en un canal. Los umbrales más someros (DE y SL) presentan un comportamiento parecido de θ . La inclinación en los puntos mas cercanos al fondo son de 134° y 145° en DE y SL, respectivamente. Esta inclinación disminuye ligeramente en la primera celda del ADCP y aumenta a partir de los 50 m PEF hasta alcanzar valores de 142° y 150° , respectivamente, para luego disminuir nuevamente cerca de la superficie a 139° y 128° . Es interesante notar que el decremento de ~ 25 grados en la inclinación superficial de SL, respecto a su valor máximo, es comparable con el de SE.

A continuación se describe la fase de la corriente de marea M_2 en los umbrales. Este parámetro indica el tiempo dentro del ciclo de marea en que ocurre la máxima corriente, es decir, cuando el vector de corriente se encuentra sobre el eje mayor. Una fase menor indica una ocurrencia más temprana de la corriente máxima, mientras que una fase mayor indica un retraso. En la figura 5d puede verse que la estructura de Φ es similar en los umbrales profundos y someros. En el fondo de SE hay una fase de 174° la cual se atrasa 12 grados a 325 m PEF y se adelanta nuevamente cerca de la superficie hasta tomar valores de 178° , esta variación de cuatro grados entre la fase cerca del fondo y la superficie indica una ocurrencia de la corriente casi simultánea. CB presenta un comportamiento parecido, los 173° cerca del fondo salvo un retraso de 12 grados a 300 m PEF, se mantienen casi constantes hasta la superficie. Caso contrario ocurre en los umbrales SL y DE, la fase cerca del fondo en SL, 180° , tiene un retraso máximo (respecto a los otros umbrales) de 22 grados a 100 m alcanzando 202° para despues volver a adelantarse cerca de la superficie, donde se encuentran valores de 173° . En el caso de DE la corriente cerca del fondo antecede a toda la columna de agua y, además, presenta la fase más temprana de los cuatro umbrales con un valor de 156° ; apróximadamente a la misma distancia del fondo que en SL hay un retraso de fase, 186° , la cual a partir de los 100 m vuelve a adelantarse hasta tomar 174° en la superficie.

Es interesante notar que los umbrales SL y DE presentan un retraso significativo de $\sim 20^\circ$ desde el fondo hasta ~ 100 m PEF. Considerando el armónico M_2 , esto equivale a casi 40 minutos de retraso de las corrientes a 100 m PEF respecto a las del fondo. En estos dos umbrales es precisamente donde se localizan intensos flujos promedio cerca del fondo, los cuales corresponden a corrientes de gravedad que descienden hacia las cuencas profundas del Canal de Ballenas y Delfín (López *et al.*, 2008). En contraste, las corrientes en los otros dos umbrales tienden a ser mucho más simultáneas en toda la columna de agua.

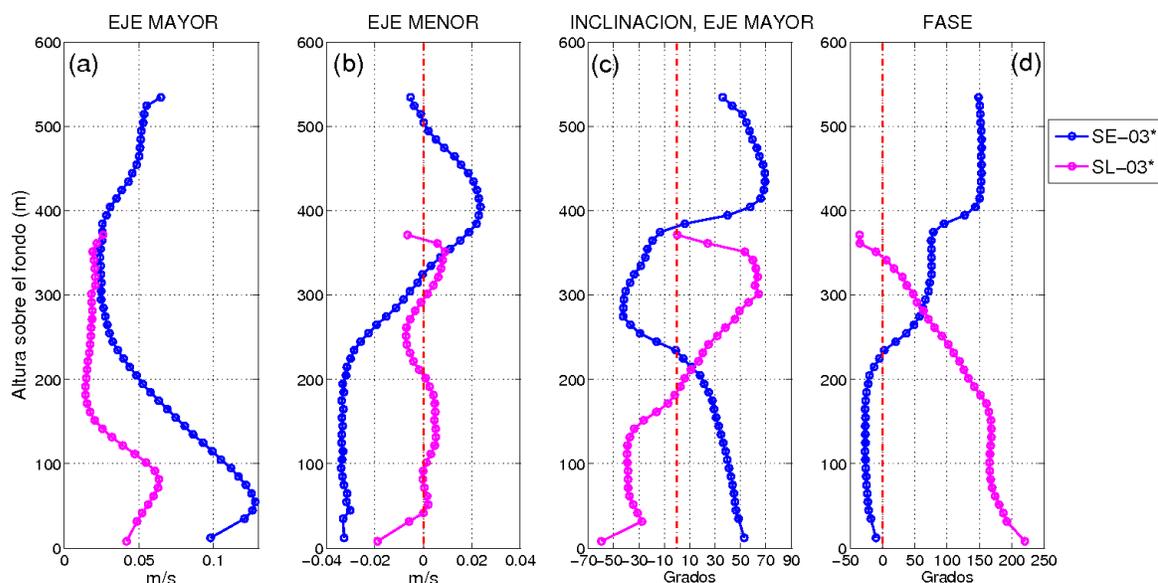


Figura 6. Parámetros de las elipses de marea para el armónico M_4 en los umbrales SE y SL. El asterisco indica la presencia de un corrientímetro cerca del fondo

Corrientes observadas cuartidiurnas

Para analizar la estructura de las frecuencias cuartidiurnas, se graficaron los parámetros de la elipse de la frecuencia M_4 en SE y SL, umbrales que presentan los valores más altos del eje mayor así como valores de $RSR > 5$ en toda la columna (figura 6). La débil RSR en CB y DE, cerca de la superficie para el eje mayor a las frecuencias cuartidiurnas pueden verse en el apéndice C.

Los valores de M (figura 6a) para M_4 más próximos al fondo son 0.04 y 0.1 m/s en SL y SE, respectivamente. Estos aumentan en los primeros 50-100 m PEF hasta alcanzar

los valores máximos de la columna, 0.06 m/s en SL y 0.13 m/s en SE. Posteriormente comienzan a decrecer de manera que los valores de M más cercanos a la superficie son menores a los del fondo. En SL, M disminuye monotónicamente desde el valor máximo hasta ~ 0.02 m/s, valor que mantiene casi constante hasta la superficie. En el caso de SE, el eje mayor disminuye 0.1 m/s en el rango 50-300 m hasta llegar al valor mínimo de 0.02 m/s, posteriormente aumenta, y presenta un incremento de 0.04 m/s cerca de la superficie. A diferencia de los valores de M en SE para M_2 , con M_4 los más someros se intensifican.

Ambos umbrales presentan cambios en el sentido de rotación del vector de velocidad. Los valores de m en SE, se mantienen constantes en los primeros 200 m a -0.03 m/s y posteriormente presentan dos cambios de sentido a 325 y 500 m PEF. En SL, el máximo valor de m ocurre cerca del fondo (~ -0.02 m/s) y en general, la magnitud de m es muy pequeña en toda la columna de agua (figura 6b).

La inclinación (figura 6c) de ambos umbrales varía entre $\pm 70^\circ$, ésto indica un amplio rango de variación de 140° de la corriente cuartidurna, la cual tiende a alinearse con el eje del GC únicamente a media columna en SE y cerca del fondo en SL. En SE, la corriente M_4 en los 200 m PEF y cerca de la superficie es prácticamente transversal al golfo, mientras que alrededor de 300 m PEF hay un rango reducido de corrientes paralelas al golfo.

En SL, las corrientes próximas al fondo están alineadas con el eje del golfo, a partir de los 150 m PEF dicha orientación comienza a modificarse. Esto, probablemente está relacionado a la muy pequeña sección transversal del umbral cerca del fondo (López *et al.*, 2006). En cambio, cerca de la superficie a ~ 300 m PEF, el eje mayor cambia de dirección y tiende a alinearse con el eje transversal al golfo.

Como puede verse en la figura 6d, el rango de variación de la fase es de ~ 170 grados en SE y de ~ 250 grados en SL, ésto indica un gran desfase entre la corriente profunda y superficial. En SE, la corriente ocurre primero cerca del fondo, donde Φ toma valores que se mantienen entre -10° y -20° en los primeros 200 m y continua retrasandose hasta alcanzar 150° cerca a la superficie. Este umbral presenta dos puntos de rápido cambio de fase a 250 y 390 m PEF. La estructura de la fase en SL es opuesta, el punto más cercano al fondo presenta la mayor fase y ésta tiende a disminuir de tal manera que las corrientes cerca de

Tabla II. Parámetros de las elipses de marea durante los períodos observados (número junto al acrónimos del umbral) en umbrales del norte y del sur del archipiélago. El asterisco (*) indica la presencia de un corrientímetro cerca del fondo.

Análisis armónico de las corrientes barotrópicas para el armónico M_2						
<i>Parte norte</i>	<i>CB-01</i>	<i>CB-02 *</i>	<i>CB-03 *</i>	<i>CB-04</i>	<i>CB-05</i>	<i>DE *</i>
M (m/s)	0.5	0.5	0.47	0.5	0.49	0.24
m (m/s)	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0
θ ($^\circ$)	123	125	125	124	125	138
ϕ ($^\circ$)	180	179	180	180	180	179
<hr/>						
<i>Parte sur</i>	<i>SL-01</i>	<i>SL-02 *</i>	<i>SL-03 *</i>	<i>SE-01</i>	<i>SE-02 *</i>	<i>SE-03 *</i>
M (m/s)	0.53	0.52	0.50	0.60	0.56	0.54
m (m/s)	-0.03	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	-0.04
θ ($^\circ$)	140	141	138	142	141	142
ϕ ($^\circ$)	186.5	189	187	188.5	190	182

la superficie están adelantadas aproximadamente 180° con respecto a las profundas.

Como se ha visto, la estructura vertical de los parámetros de la elipse de las corrientes observadas difieren sustancialmente para los armónicos M_2 y M_4 debido a que ésta última presenta un comportamiento más baroclínico y además presenta corrientes aproximadamente transversales al golfo en gran parte de la columna de agua, especialmente en SE.

III.1.2 Corrientes barotrópicas y presión subsuperficial

Con el AA de las corrientes barotrópicas obtuvimos los valores de la tabla II, en ella se observa la consistencia de los parámetros de la elipse para los distintos períodos de observación. Los valores de M para DE y SE, son 0.24 y 0.56 m/s respectivamente, donde M en SE es más del doble que en DE, mientras que en CB y SL los valores son alrededor de 0.5 m/s. En cuanto al eje menor, todos los valores son muy pequeños, indicando corrientes barotrópicas unidireccionales.

Existen características evidentes en la inclinación y fase para los umbrales localizados al norte (DE y CB) y al sur (SL y SE) del archipiélago. Se encontró que la corriente en los umbrales del norte, se encuentra mejor orientada con el eje del GC ($\sim 125^\circ$), como puede verse en los valores de θ en DE y CB, de 138 y 124° , respectivamente, además es interesante

Tabla III. Parámetros del análisis armónico de la presión subsuperficial, durante los períodos observados en seis localidades. Las siglas significan: CB-AG canal de Ballenas del lado de la isla, CB-BC canal de Ballenas del lado de la península, SF-San Francisquito, SL-San Lorenzo, SE-San Esteban y TI-Tiburón.

Análisis armónico de M_2 para la presión subsuperficial					
<i>Parte norte</i>	<i>Fase ($^\circ$)</i>	<i>Amplitud (m)</i>	<i>Parte sur</i>	<i>Fase ($^\circ$)</i>	<i>Amplitud (m)</i>
<i>CB-AG</i>	259	0.91	<i>SF 01</i>	262	0.42
<i>CB-BC 01</i>	265	0.89	<i>SF 02</i>	262	0.42
<i>CB-BC 02</i>	264	0.89	<i>SL</i>	252	0.44
-	-	-	<i>SE 01</i>	245	0.38
-	-	-	<i>SE 02</i>	243.5	0.38
-	-	-	<i>TI 01</i>	243.4	0.47
-	-	-	<i>TI 02</i>	244	0.46

notar que la orientación en CB difiere por lo menos 13° del resto de los umbrales. Por otro lado, los valores de la fase de la corriente barotrópica indican que en los umbrales del norte, la corriente máxima tiene lugar antes que en los del sur, debido a que la fase en DE y CB está en promedio ~ 7 grados adelantada respecto a la fase de los umbrales del sur. Esta pequeña diferencia indica que los umbrales SL y SE presentan un retraso de 14 minutos de la fase para el armónico M_2 .

Los parámetros del AA obtenidos a partir de los datos de presión subsuperficial registrados en seis localidades aledañas a los umbrales aparecen en la tabla III. Excepcionalmente SF, los valores más tempranos de la fase de la presión subsuperficial ocurren en las localidades sureñas, especialmente en TI con 243° y aumentan hacia el norte, siendo CB-BC con 264° la fase más tardía. La progresión registrada está en acuerdo con el modelo conceptual que considera a la marea en el GC como una onda de Kelvin que se introduce por la costa Este y progresa ciclónicamente en la parte norte del golfo (Marinone y Lavín, 1997). Además, puede observarse como las fases en las localidades de la costa Oeste (SF y CB-BC) tienden a ser casi simultáneas, mientras que en las localidades al sur del archipiélago (SE, SL y SF) la progresión de la onda es muy rápida. Pese a su cercanía (~ 20 km) la fase aumenta progresivamente $\sim 10^\circ$ en cada localidad a partir de SE. Las mayores amplitudes registradas se ubican en CB-AG y CB-BC con 0.91 y 0.89 m respectivamente, mientras que las localidades del sur, las amplitudes son casi la mitad de lo que se obtiene en la zona

Tabla IV. Diferencia de fases entre la presión subsuperficial y corrientes barotrópicas para el armónico M_2 en los cuatro umbrales.

<i>Umbrales del norte</i>	CB	85°	DE	80°
<i>Umbrales del sur</i>	SL	57°	SE	57°

norte del canal de Ballenas, estos valores concuerdan con las máximas amplitudes del GC localizadas en la cabeza del golfo (Lavín y Marinone, 2003).

La solución más elemental para un golfo rectangular unidimensional, es la de una onda estacionaria en la que la corriente a lo largo del golfo y el nivel del mar están desfasados 90° (Hendershott y Speranza, 1971; Godin, 1988). Para ver si el archipiélago se ajusta a este modelo idealizado, se calcularon las diferencias de fase entre la presión subsuperficial y la corriente barotrópica (tabla IV). Para ello se consideró: la fase promedio del nivel del mar de las localidades más proximas a la derecha de cada umbral, y el promedio de las fases de las corrientes barotrópicas ahí registradas. Los desfases más grandes, 85° y 80°, corresponden a los umbrales del norte, CB y DE, mientras que en los umbrales del sur, SE y SL, los desfases disminuyen a 57°. Los desfases positivos indican que la corriente de marea, con dirección a la cabeza del golfo, antecede a la máxima amplitud del nivel del mar. Los desfases encontrados en el archipiélago, concuerdan con los obtenidos por (Lino Pérez, 2004), quien sugiere que la disminución paulatina del desfase encontrado en los umbrales del sur, resultado del retraso de la corriente, se debe a fenómenos locales en los que la onda de marea se ajusta a las condiciones de cambios bruscos de la batimetría y a la línea de costa.

III.1.3 Corrientes baroclínicas

Las corrientes baroclínicas pueden considerarse como una anomalía de la corriente observada por la manera en que se definen: diferencia entre la corriente observada menos la barotrópica. El efecto de las corrientes baroclínicas es importante, pues parecen ser responsables de la estructura vertical de la corriente observada. Jiménez Lagunes (2003) en su estudio del umbral Delfín, sugiere que las corrientes de marea a la frecuencia M_2

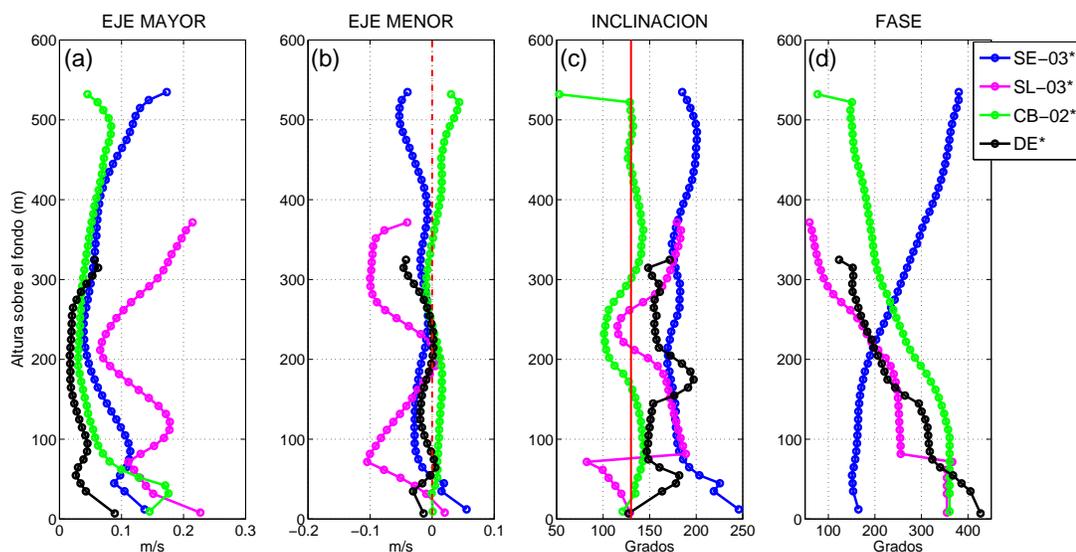


Figura 7. Parámetros de las elipses de marea de la corriente baroclínica para el armónico M_2 . El significado de los números en el recuadro y la línea roja en la inclinación son los mismos que en la figura 5.

presentan una contribución significativa de las corrientes baroclínicas las cuales tienden a intensificar (debilitar) a las corrientes barotrópicas cerca de la superficie (fondo). A continuación describiremos la estructura vertical de las corrientes baroclínicas en los cuatro umbrales a través de los parámetros de las elipses (figura 7). Posteriormente veremos el efecto de estas corrientes sobre los perfiles de las corrientes de marea.

Los valores de M de las corrientes baroclínicas son pequeños comparados con los de la corriente observada, pero mayores (en el caso de SL) ó comparables (en el caso de SE) con los valores de M de la corriente observada cuartidurna. El eje mayor de las corrientes baroclínicas registrado cerca del fondo, salvo SE, corresponden a los valores máximos de toda la columna. Los valores más altos de las corrientes baroclínicas a la frecuencia M_2 se encuentran en el umbral SL. En este umbral el máximo valor se presenta cerca de fondo, seguido por los puntos más superficiales con valores de 0.2 m/s, además a ~ 120 m PEF, SL presenta una intensificación importante de casi 0.2 m/s. Las amplitudes en los otros tres umbrales son menores, siendo SE el segundo umbral con mayores valores de M en toda la columna, excepto cerca del fondo, donde el umbral CB presenta valores ligeramente mayores.

El eje menor presenta magnitudes semejantes a las de la corriente observada, en general los ejes menores de los umbrales tienden a ser negativos (rotación anticiclónica) con excepción del umbral CB, donde la mayoría de los valores son positivos. Todos los umbrales presentan cambios en el sentido de rotación (variación del signo de m en la vertical), pero estos son marginales (véase figura 7b).

En general la inclinación del eje mayor de las corrientes baroclínicas varía en un rango de 200° (figura 7c). Las variaciones más grandes las presenta el umbral SL, el cual presenta un cambio abrupto de inclinación de $\sim 100^\circ$ a 70 m PEF; cerca del fondo presenta una inclinación paralela al golfo y esta gira gradualmente hacia una dirección más este-oeste a media columna y cerca de la superficie. Luego del cambio abrupto, la inclinación tiende a ser transversal al golfo. Es interesante notar que el cambio abrupto de la inclinación en SL está acompañado de un cambio también abrupto de $\sim 100^\circ$ en la fase (figura 7d). Como se ha visto, los cambios de fase entre fondo y superficie son graduales y prácticamente de 180° en las corrientes baroclínicas, a excepción del cambio abrupto de SL mencionado con anterioridad. Además, se observa que las corrientes máximas en los umbrales SL, CB y DE ocurren más temprano en la superficie que en el fondo, caso contrario a SE (figura 7d).

Una manera sencilla de ver el efecto de la corriente baroclínica sobre la estructura vertical de la corriente observada, es considerando la suma de dos armónicos que representan a la corriente barotrópica y baroclínica,

$$u = A_U \cos(ft - \phi_U) + A_{u'} \cos(ft - \phi_{u'}) \quad (17)$$

donde u es un armónico de la corriente observada y A_U , $A_{u'}$, ϕ_U y $\phi_{u'}$ son las amplitudes y fases de los armónicos de las corrientes barotrópicas y baroclínicas, respectivamente. Manipulando la ecuación anterior es posible escribir la siguiente relación entre las amplitudes de los tres armónicos

$$\frac{A_u}{A_U} = \sqrt{1 + \left(\frac{A_{u'}}{A_U}\right)^2 + 2\frac{A_{u'}}{A_U} \cos(\phi_{u'} - \phi_U)} \quad (18)$$

donde A_u es la amplitud del armónico correspondiente de la corriente observada. De la ecuación (18) se puede ver que la suma constructiva o destructiva de las corrientes

barotrópicas y baroclínicas depende de la razón de amplitudes y diferencia de fases entre estos dos armónicos, pero principalmente de la diferencia de fases (véase figura 8). Para las razones de $A_{u'}/A_U$ que se dan en los umbrales del GC, la suma es constructiva cuando $|\phi_{u'} - \phi_U| < 100^\circ$.

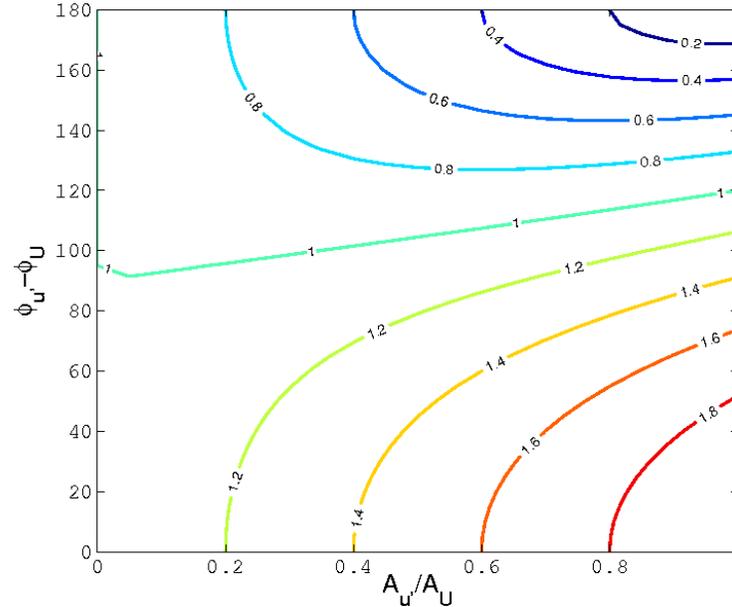


Figura 8. Contornos de la razón, entre la amplitud de la corriente para una frecuencia de marea y la amplitud de la corriente barotrópica, como función de $A_{u'}/A_U$ y $\phi_{u'} - \phi_U$, véase ecuación 18.

Es importante aclarar que la ecuación 17 es para una sola componente de la velocidad y para poder aplicarla al eje mayor de las corrientes observadas, se rotaron las corrientes barotrópicas y baroclínicas al ángulo del eje mayor de las corrientes observadas para cada una de las profundidades disponibles. En la figura 9, se muestran las tres variables de la ecuación (18) (A_u/A_U , $A_{u'}/A_U$, $\phi_{u'} - \phi_U$) para los cuatro umbrales. La intensificación de la corriente observada con respecto a la barotrópica, corresponde a un valor $A_u/A_U > 1$, donde A_u es el eje mayor de la corriente observada (M_{obs}) y A_U es la amplitud de la componente de la corriente barotrópica en la dirección del eje mayor.

Como puede verse en la primera columna de la figura 9, en DE a partir de ~ 80 m PEF crece la razón de amplitudes y después de ~ 180 m las corrientes baroclínicas (BCL) intensifica a las observadas (OBS) hasta alcanzar el máximo valor de 1.24 a 315 m PEF. SL presenta valores que crecen continuamente desde el fondo pero únicamente a partir de los

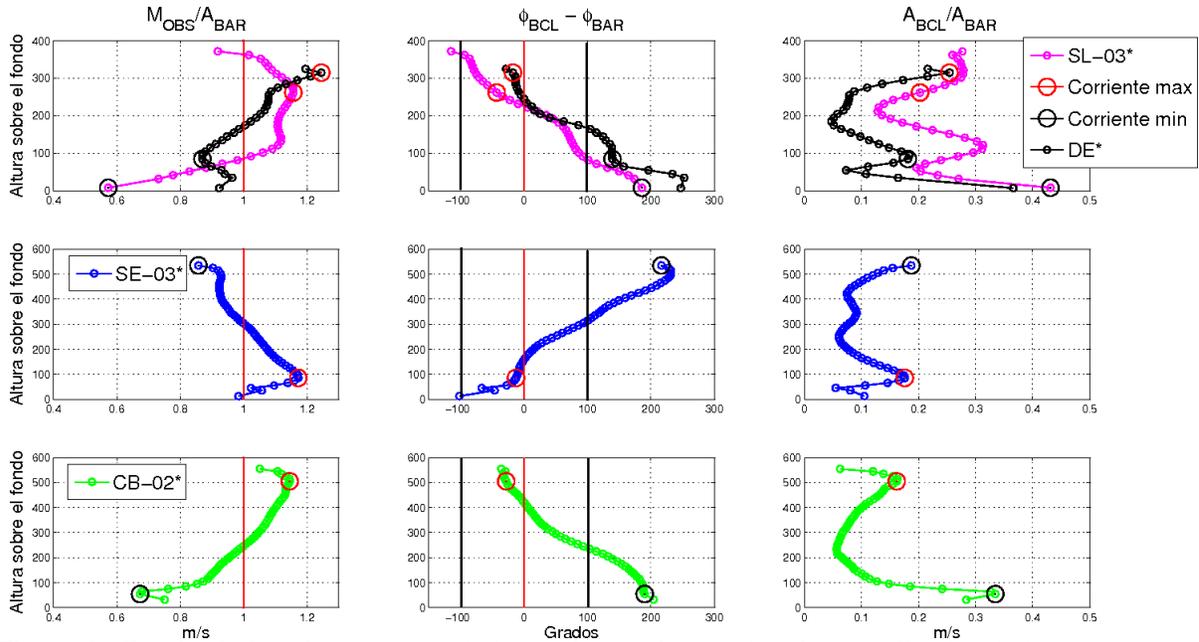


Figura 9. Razón de los ejes mayores de la corriente observada y las amplitudes de la componente barotrópica (primera columna); diferencia de fase entre la corriente baroclínica y barotrópica (segunda columna); y razón de amplitudes entre la corriente baroclínica y barotrópica (tercera columna), para el armónico M_2 . Las amplitudes y fases de la corriente barotrópica y baroclínica, corresponden a la componente paralela al eje mayor de la corriente observada. Las líneas punteadas así como los círculos rojos y negros indican: el intervalo comprendido entre $\pm 100^\circ$ y los datos correspondientes al máximo y al mínimo valor de la corriente observada, respectivamente.

100 m PEF las corrientes BCL tienden a intensificar a las OBS. A ~ 260 m ocurre el máximo valor de 1.15 y posteriormente la corriente comienza a decrecer hasta los datos superficiales. En SE las intensificaciones ocurren cerca del fondo y el máximo valor alcanzado es de 1.17 a 80 m PEF. La razón, aún con valores mayores a uno comienza a decrecer, hasta alcanzar 0.85 cerca de la superficie. Por lo tanto en SE, las corrientes BCL intensifican a las OBS en la primera mitad de la columna de agua y las debilitan en la mitad superior. A excepción del punto más cercano al fondo, en el umbral CB se observa un incremento gradual de la razón a partir del fondo hasta los datos cerca de la superficie. A partir de los ~ 250 m PEF, las corrientes BCL intensifican a las OBS en toda la mitad superior de la columna de agua, llegando a alcanzar 1.14. El patrón en CB es por lo tanto, contrario al de SE ya que en CB las corrientes BCL debilitan a las OBS en la mitad inferior de la columna de agua y las intensifican en la mitad superior.

En la segunda columna de la figura 9 se presentan las diferencias de fase entre la

corriente baroclínica y barotrópica. Se observa que datos comprendidos en el intervalo $\pm 100^\circ$ corresponden a intensificaciones de M_{OBS}/A_U . En DE, SL y CB los desfases cercanos al fondo son mayores 100° y disminuyen conforme se acercan a la mitad de la columna. En DE los desfases menores a 100° ocurren por encima de ~ 180 m PEF, aquellos entre 200-300 m PEF corresponden a desfases próximos a cero. En SL los datos entre 70-350 m PEF presentan desfases menores a 100° . En SE la diferencia de fase menor a 100° comprende todos los datos por debajo a 300 m PEF, a excepción del dato más cercano al fondo, mientras que los más superficiales, presentan valores próximos a 200° .

La razón entre las amplitudes de los ejes de la corriente baroclínica y barotrópica aparece en la tercera columna de la figura 9. La estructura de esta razón, es parecida en SL y DE ya que los valores máximos aparecen cerca del fondo y corresponden a 0.44 y 0.36, respectivamente. Posteriormente decrecen y se intensifican a ~ 100 m PEF y cerca de la superficie. Particularmente SE presenta pequeños valores de la razón cercanos al fondo, mientras que sus valores máximos ocurren a aproximadamente a 100 m PEF y en el dato más somero. CB presenta el máximo valor de 0.34 en el segundo dato PEF mientras su mínimo valor ocurre a ~ 200 m PEF. El segundo máximo relativo de CB está a ~ 500 m PEF, después del cual la razón disminuye.

La importancia de las corrientes de marea puede estimarse a través de la razón de varianzas entre la predicción de las corrientes de marea y las corrientes observadas (figura 10). En los tres umbrales con corrientes más energéticas (SL, SE y CB), las corrientes barotrópicas contribuyen con más del 75% de la varianza de las corrientes en esas localidades, la razón de la varianza de las corrientes observadas nos indica como únicamente cerca del fondo y de la superficie disminuyen un poco esas contribuciones (figura 10a). En el umbral DE, las corrientes de marea a pesar de ser menos energéticas, contribuyen con más del 65%. Con excepción de DE, la razón de varianzas es bastante uniforme en la vertical. Cabe destacar que la contribución más grande en SE es ligeramente mayor cerca del fondo al igual que DE, pero éste último presenta además un máximo relativo a media columna. En SL, la mayor contribución tiende a estar a media agua, y en el caso de CB está cerca de la superficie.

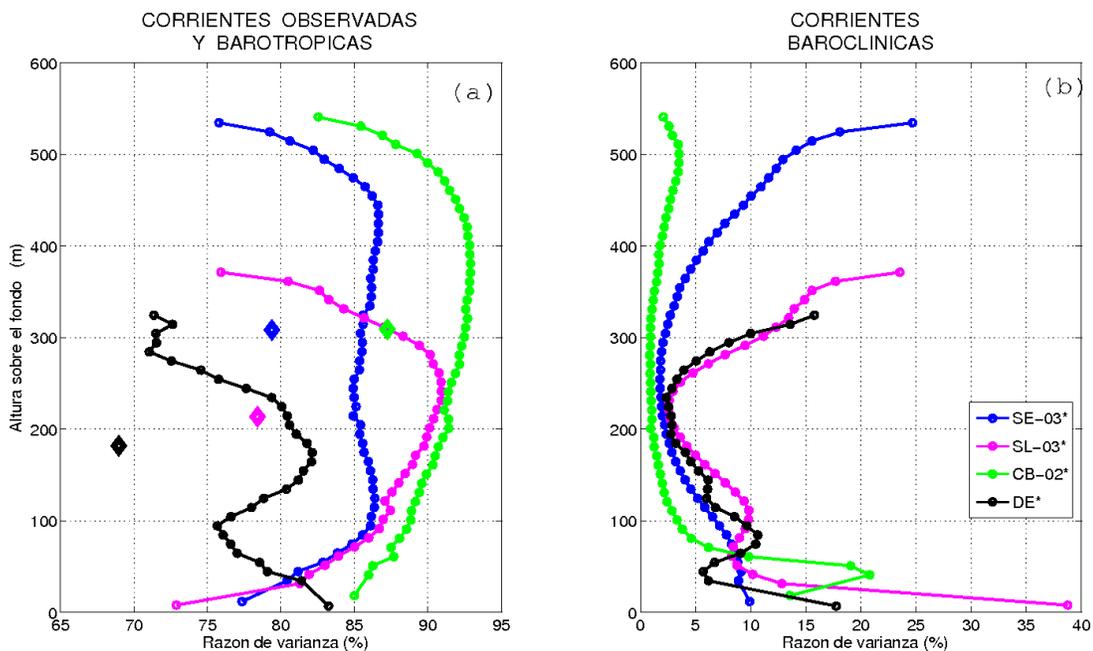


Figura 10. Razones de varianzas entre la predicción de las corrientes de marea y las corrientes observadas. (a) Predicción de corrientes observadas y barotrópicas; (b) predicción de corrientes baroclinicas (b).

Las corrientes baroclinicas en cambio, tienen una contribución más modesta a las corrientes de marea (figura 10b). Es en la superficie y cerca del fondo donde la contribución es mayor, llegando a ser de casi 40% en el caso de SL-03.

Los altos valores de la varianza de la corriente baroclinica indican una covarianza negativa entre la corriente barotrópica y baroclinica cerca del fondo, es decir que en los puntos próximos al fondo ambas corrientes estan correlacionadas negativamente.

III.2 Demodulación compleja

La presencia de corrientes de baja frecuencia en la región del archipiélago ha sido registrada por distintos autores (Jiménez Lagunes, 2003; López *et al.*, 2006, 2008). Con el fin de identificar la posible influencia de estas corrientes o de otros fenómenos sobre las corrientes de marea, se ha calculado la variación temporal de la amplitud y fase de estas últimas a través de la demodulación compleja (sección II.2.2). En esta sección se presentan resultados utilizando la demodulación compleja con admitancia (DCA), uno de tres métodos analizados. Los resultados obtenidos con la demodulación compleja para una frecuencia (DCF) se omiten porque son parecidos a los de la DCA (ver figura 11 y apéndice A). Mientras que los resultados de la demodulación compleja clásica (DCC) no fueron satisfactorios. En el apéndice A se comparan los tres métodos y se explica porque DCC no dio buenos resultados.

A partir de la componente de máxima variabilidad de la corriente observada, se obtuvieron las series de tiempo de la amplitud y fase de la demodulación compleja, A_{DC} y ϕ_{DC} , respectivamente, para las corrientes observadas y baroclínicas. Estos parámetros fueron correlacionados con la componente de máxima variabilidad de la corriente de baja frecuencia (U_{BF}), la cual se tomó como positiva hacia la cabeza del golfo (dirección *NW*). Los resultados encontrados se mencionan a continuación.

III.2.1 Demodulación compleja en San Lorenzo

Demodulación compleja de la banda semidiurna de las corrientes observadas

En el caso de SL-03, la inclinación promedio de las componentes de máxima varianza de la corriente observada y U_{BF} , es 139 y 135°, respectivamente, lo cual indica que ambas son paralelas al eje del golfo y que tienen una orientación preferencial hacia la cabeza del golfo. Los resultados obtenidos para los métodos de demodulación compleja de una frecuencia (DCF) y admitancia (DCA) para el armónico M_2 y la banda semidiurna, respectivamente, se presentan en la figura 11. La estructura vertical de la correlación de ambos métodos es parecida, siendo los valores de A_{DC} para la DCA ligeramente mayores que la DCF a 50

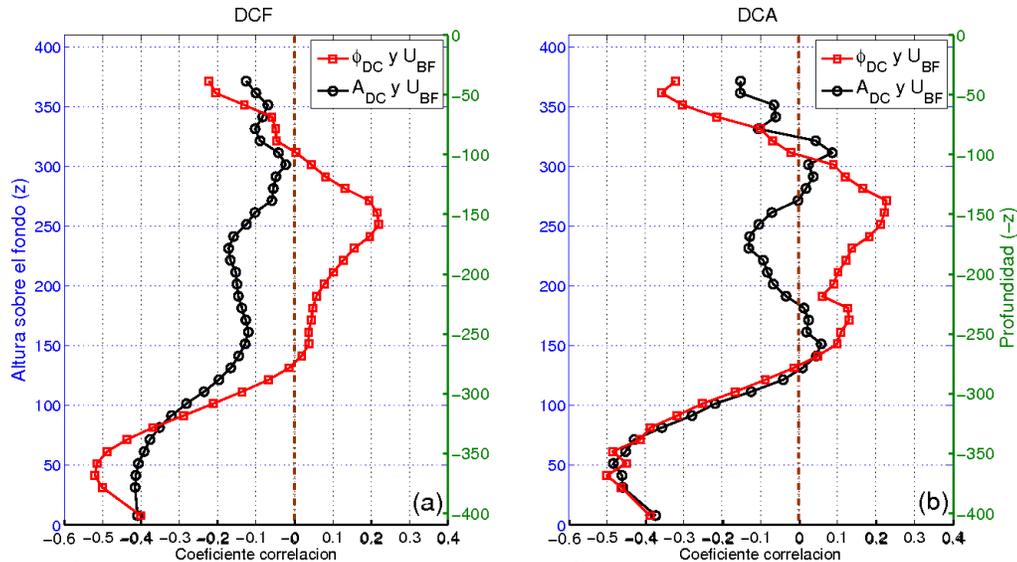


Figura 11. Correlación entre la corriente de baja frecuencia y los parámetros obtenidos con el método de demodulación compleja para una frecuencia: DCF (a), y el método de demodulación compleja con admitancia: DCA, (b). En el umbral SL-03, para el armónico M_2 y la banda semidiurna, respectivamente. Los cuadrados (círculos) indican correlación entre la fase (amplitud) de la demodulación compleja y la serie de baja frecuencia.

m PEF, y menores a 150 m PEF. La mayor correlación, entre las series de los parámetros de la demodulación compleja y U_{BF} , es -0.5 a 50 m PEF. La evolución temporal de A_{DC} superpuesta a la corriente de baja frecuencia, (figura 12a), indica que el aumento de la U_{BF} hacia la cabeza del golfo está relacionada con el decremento de A_{DC} y viceversa. Las correlaciones negativas para la fase (figura 11b) indican que a una disminución de U_{BF} le corresponde un aumento de fase y viceversa. Como puede verse en la figura 12b, el rango de variación de la fase ($\pm 20^\circ$ equivalente a ± 41 min) es considerable.

Los valores $A_{DC} > 1$ así como las fases y valores de U_{BF} correspondientes, ejemplifican el comportamiento que se observa cerca del fondo en SL: el aumento de la corriente de baja frecuencia está asociada con la disminución de la amplitud y al adelanto de la fase de la corriente de marea y viceversa. La coherencia entre los parámetros de la DCA y la corriente de BF, permite identificar las frecuencias predominantes en la corriente observada (figura 13). A partir de cinco segmentos de 106 días se encontraron coherencias significativas de ~ 0.62 para A_{DC} y U_{BF} , figura 13a-1, para frecuencias de 0.01 y 0.02 ciclos por día (cpd)

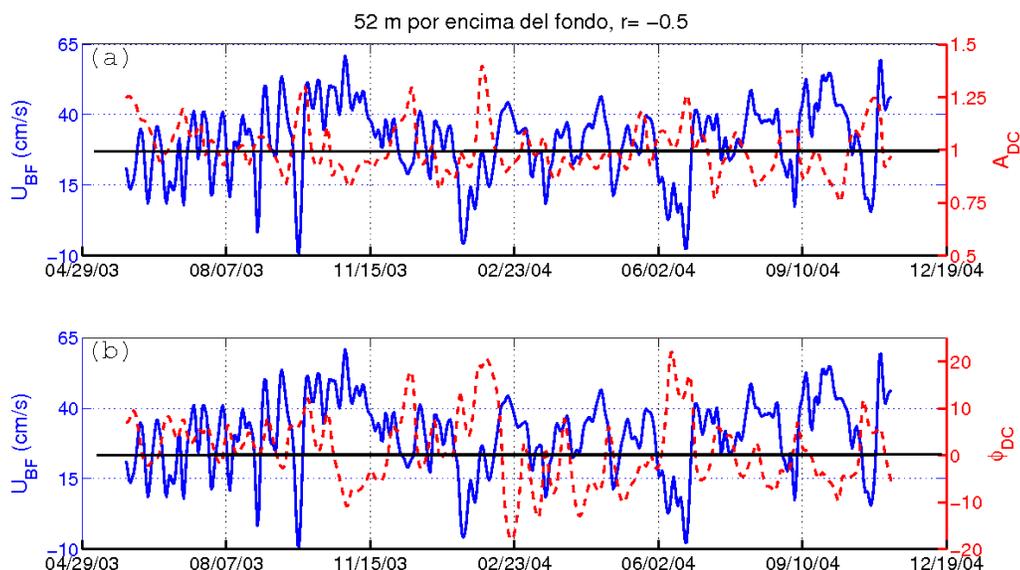


Figura 12. Serie de (a) la amplitud y (b) la fase obtenidos con la demodulación compleja con admitancia (rojo) para la banda semidiurna en SL-03. La serie en azul de (a) y (b) corresponde a la corriente de baja frecuencia (U_{BF}), sus valores positivos indican flujo hacia la cabeza del golfo. Todas las series corresponden a 52 m PEF y presentan una correlación (r) de -0.5 .

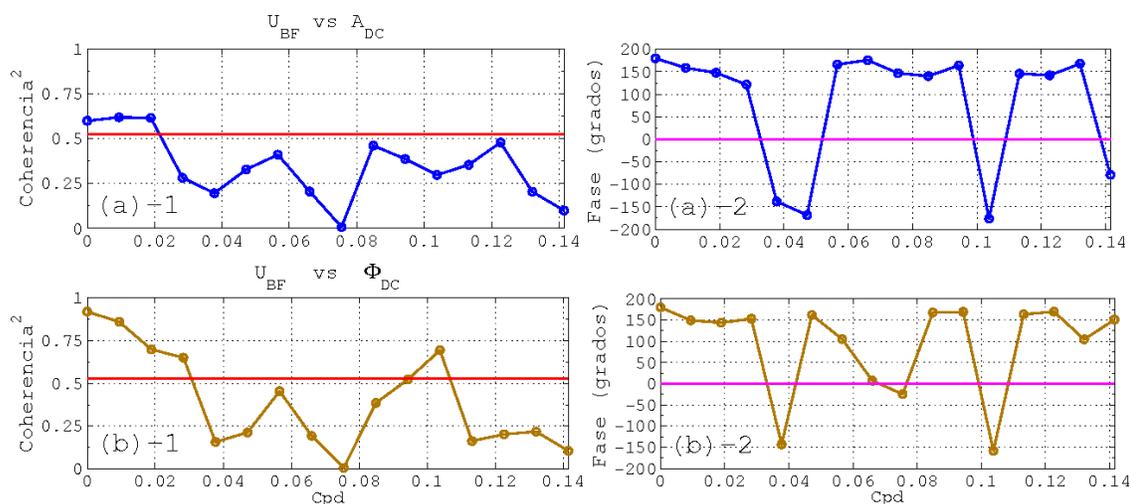


Figura 13. Coherencias y fases correspondientes a las series que aparecen en la figura 12. La línea roja en las coherencias indica el valor mínimo significativamente distinto de cero con un 95% de confianza.

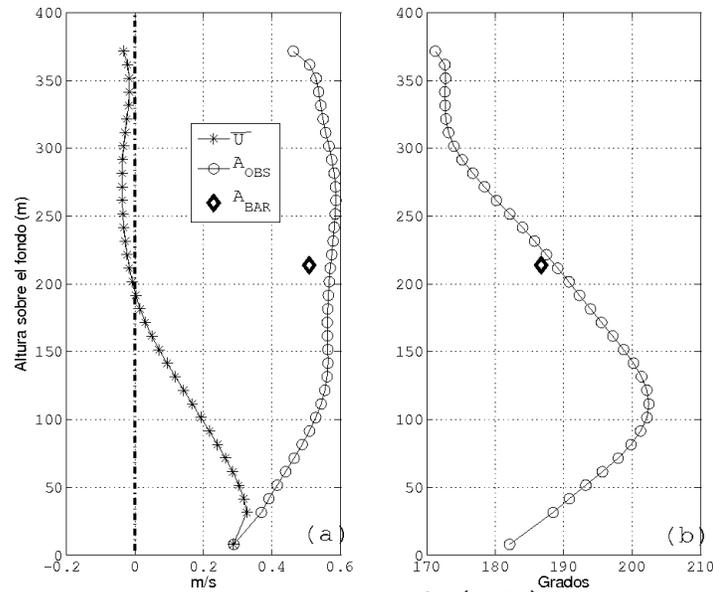


Figura 14. (a) Corriente promedio paralela al golfo (146°). A partir de la componente de maxima varianza de la corriente, se calculó la amplitud (a) y fase (b) de la corriente observada y barotrópica para M_2 en el umbral SL-03.

equivalentes a períodos de 100 y 50 días con desfases de 160 y 150°, respectivamente (véase figura 13a-2). Valores mayores de la coherencia se obtuvieron para ϕ_{DC} y U_{BF} , de 0.85, 0.7 y 0.65 para frecuencias cuyos periodos son de 100, 50 y 33 días como se ve en la figura 13b-1. En la figura 13b-2 se observan fases correspondientes de 150, 145 y 155°, respectivamente. Estos resultados son consistentes con las correlaciones encontradas. Además es interesante notar que la relación entre la amplitud y la fase de la corriente de marea y la corriente de baja frecuencia parece estar concentrada en las frecuencias más bajas que se pudieron resolver.

Otro hecho interesante, es que en SL la U_{BF} parece influir en la estructura vertical de la amplitud y la fase de la corriente de marea. En la figura 14a se muestra como el máximo valor de la corriente promedio \bar{U} , 0.31 m/s, a ~ 30 m PEF le corresponde un valor de M de la corriente de marea que es 30% menor al máximo alcanzado en toda la columna de agua. En general, la figura 14 muestra que la mayor disminución de la amplitud y fase de la corriente de marea para M_2 se da en los 100 m PEF en SL, región donde precisamente la corriente media alcanza sus máximos valores. La estructura de la corriente media y de éstos dos parámetros de la corriente de marea, sugieren que los altos valores cercanos al

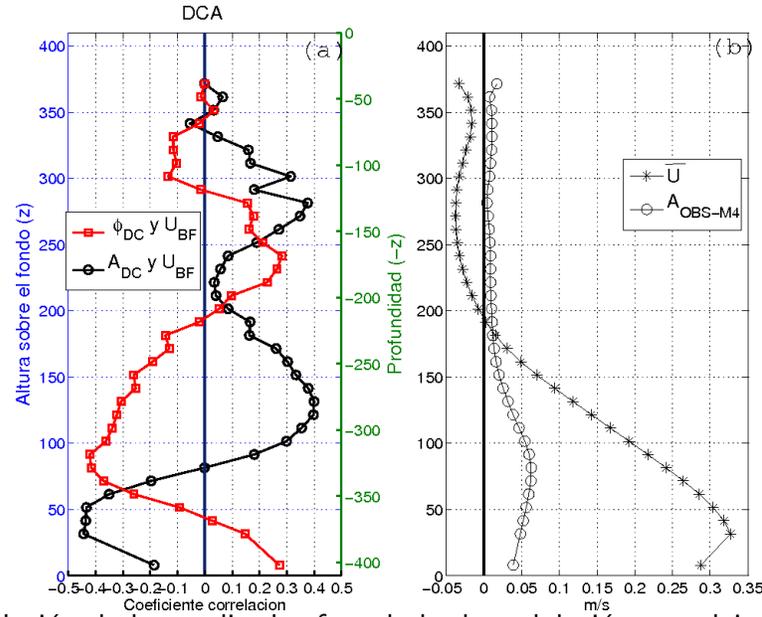


Figura 15. Correlación de la amplitud y fase de la demodulación compleja de la banda cuartidiurna, con la corriente de baja frecuencia en SL-03(a). (b) es igual que (a) de la figura 14 pero para el armónico de marea M_4 .

fondo de la corriente media, podrían ser responsables de la disminución de la amplitud y del adelanto de la fase en los 100 m próximos al fondo.

Demodulación compleja de la banda cuartidiurna de las corrientes observadas

Las corrientes de BF parecen afectar también a los armónicos cuartidiurnos de la corriente observada. En la figura 15a se observan correlaciones máximas $\geq |0.4|$ entre los parámetros de la DC de dichas corrientes de marea y la U_{BF} . Los mayores valores se encuentran a 40 y 130 m con -0.45 y 0.4 en el caso de A_{DC} y a 85 m para ϕ_{DC} con -0.43. Las correlaciones negativas en los 100 m PEF, indican una disminución de la amplitud y un adelanto de la fase cuando la corriente de BF aumenta, y viceversa. Por el contrario, a 130 m PEF la correlación positiva sugiere un aumento a la par de la corriente de marea y la corriente de BF.

Analizando la estructura vertical de la amplitud y fase de la corriente cuartidiurna, para la componente de máxima varianza, se observa que la corriente de baja frecuencia en los 100 m próximos al fondo, parece afectar a la amplitud, ya que decrece cerca del

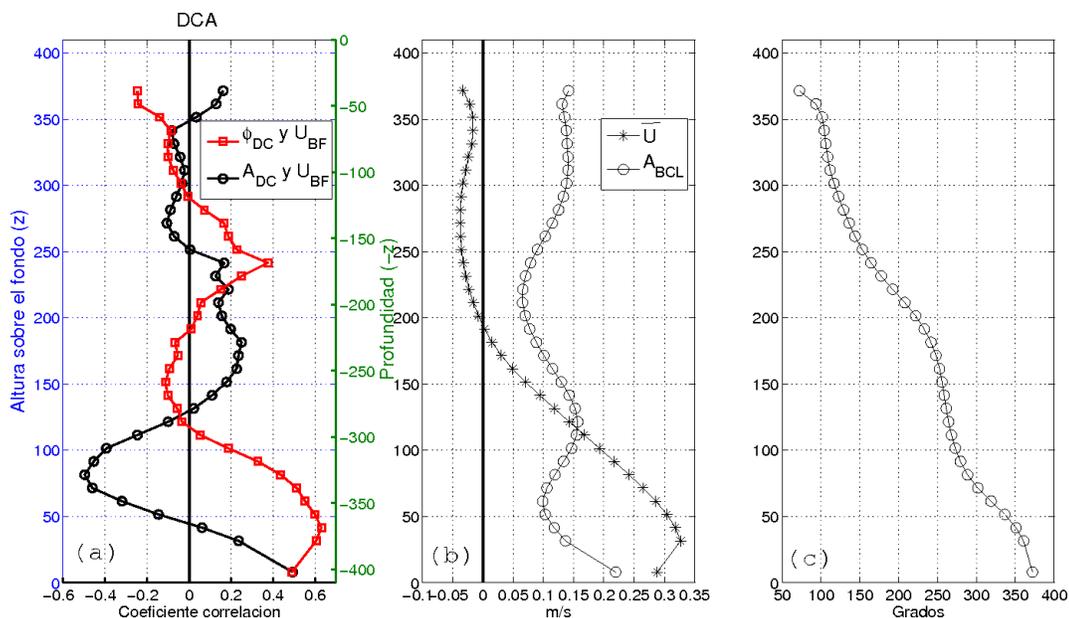


Figura 16. Igual que la figura 15, pero para la banda semidiurna de las corrientes baroclinicas y el armónico de marea M_2 .

fondo (figura 15b). Esta influencia no es evidente en la fase de la corriente (no se presenta imagen).

Demodulación compleja de la banda semidiurna de la corriente baroclínica

Es interesante notar que las corrientes baroclinicas y la corriente de BF presentan las correlaciones más altas, con -0.5 y 0.6 para A_{DC} y ϕ_{DC} , respectivamente (figura 16a). La correlación positiva a 40 m PEF entre ϕ_{DC} y U_{BF} indica que el aumento de la fase de la CM baroclínica está asociada a fluctuaciones positivas de la corriente de baja frecuencia. Similarmente, un poco más arriba en la columna de agua como a 70 m PEF la correlación negativa de -0.5 es entre la amplitud de las CM baroclinicas y la corriente de BF. El comportamiento de las corrientes baroclinicas y U_{BF} es parecido al de las corrientes observadas y cuartidiurnas, en el caso de la amplitud, no así en la fase. Como puede verse en la figura 17, la influencia de U_{BF} sobre la corriente baroclínica es más evidente ya que la magnitud de las variaciones temporales de los parámetros de la DC es mayor que en las corrientes observadas. Las altas coherencias (figura 18) mayores a 50 días, en el caso de la amplitud, y mayores a 18 días en el caso de fase, así como las fases de las coherencias son consistente

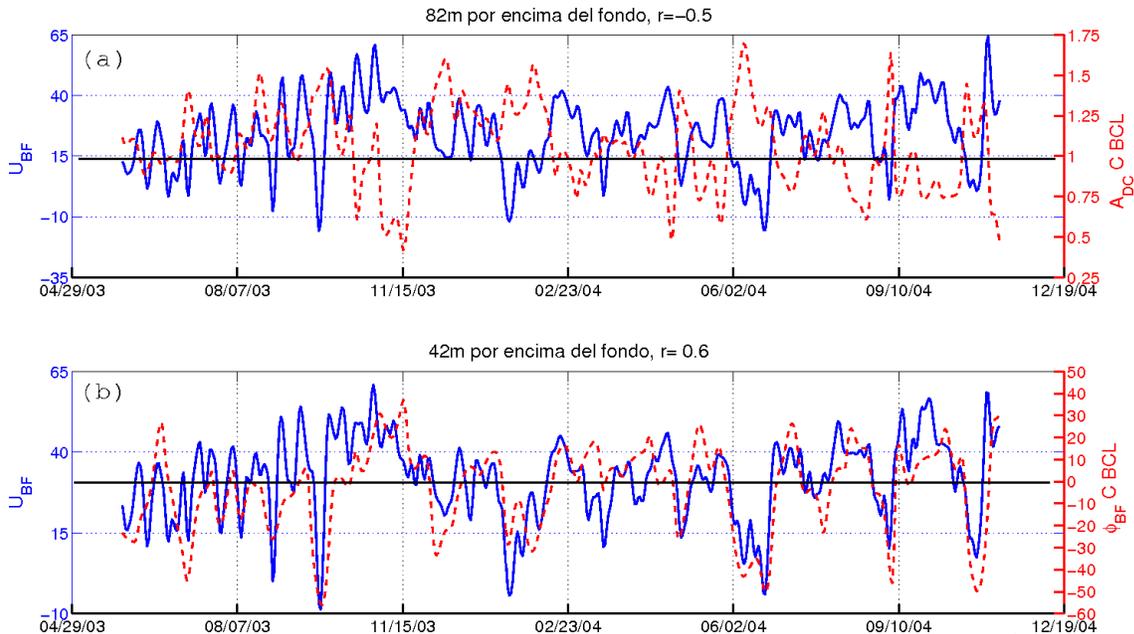


Figura 17. Amplitud de la demodulación compleja de la corriente baroclínica (roja) y corriente de baja frecuencia (azul) a la profundidad en que ambas tienen la máxima correlación. (b) Igual que (a) pero para la fase de la demodulación compleja (roja).

con las correlaciones encontradas.

La estructura vertical de la amplitud y fase de la componente de máxima varianza para la corriente baroclínica es diferente de las anteriores (figura 16). Cerca del fondo, donde la corriente promedio comienza a decrecer, la amplitud y la fase crecen. Es interesante notar que la fase se retrasa monotónicamente desde la superficie hasta el fondo.

III.2.2 Demodulación compleja en Delfín

En el umbral DE, la dirección promedio de las componentes de máxima varianza de las corrientes observadas y de baja frecuencia, también son paralelas al golfo (138° y 127° , respectivamente). En este umbral igualmente se han registrado corrientes de BF (López y García, 2003), y aunque las correlaciones no son tan altas como en el caso de SL, si parece existir una relación significativa entre la fase de la banda semidiurna y la corriente de baja frecuencia.

La mayor correlación corresponde a ϕ_{DC} , con -0.4 en la primera celda del ADCP a 35

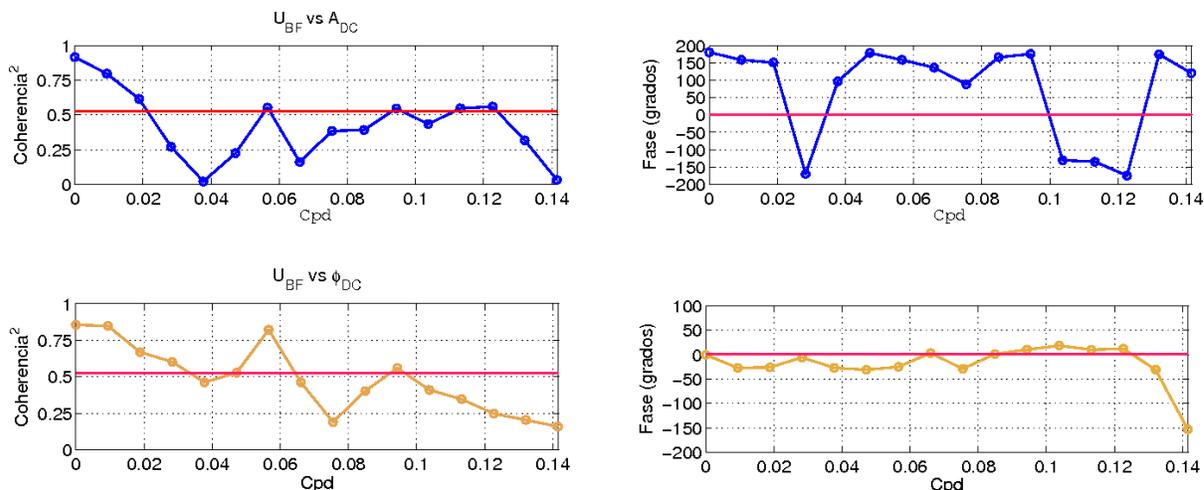


Figura 18. Coherencias y fases, correspondientes a las series que aparecen en la figura 17.

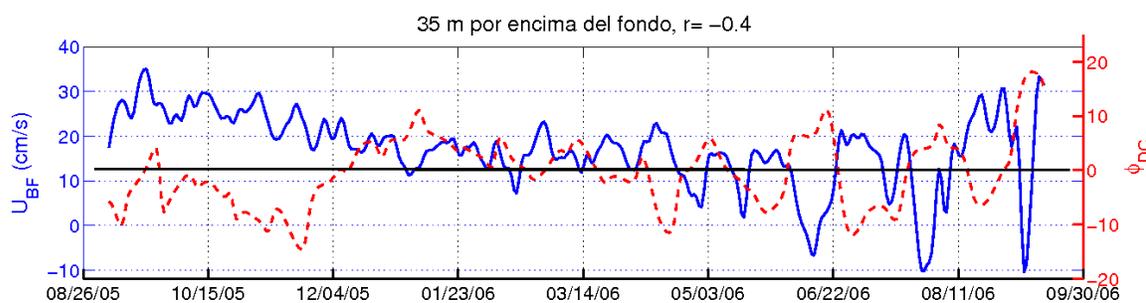


Figura 19. En rojo, ϕ_{DC} obtenida con demodulación compleja para la banda semidiurna de la corriente observada. En azul serie de baja frecuencia. Ambas calculadas a 35 m PEF en el umbral DE.

m PEF. Esto sugiere que cerca del fondo las intensificaciones de la corriente de BF están asociadas con una disminución de la fase de la corriente de marea. En la figura 19, se observa como en la primera parte de las series (agosto 2005-mayo 2006) U_{BF} no invierte su flujo, mientras que en el resto de la series existen eventos en los que la corriente se relaja e invierte su sentido (junio-septiembre, 2006). En ambos casos las intensificaciones y disminuciones de U_{BF} , están relacionadas con decrementos y aumentos de fase, respectivamente, que en su mayoría son mayores a $|5^\circ|$, excepto en la parte intermedia de las series (enero-abril, 2006).

Las coherencias calculadas entre ϕ_{DC} y U_{BF} a partir de 5 segmentos de 75 días, son de 0.7 y 0.78 para periodos de 76 y 38 días, respectivamente; como puede verse en la figura 20a-1. La fase de estas coherencias es 177° para la primera y 174° para la segunda (figura 20a-2).

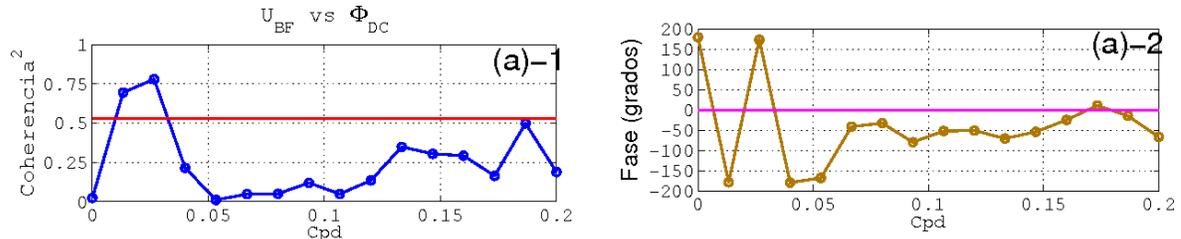


Figura 20. Coherencia y fase para las series de la figura 19

Demodulación compleja de la banda cuartidiurna y banda semidiurna de la corriente baroclínica

Los parámetros de la DC y U_{BF} presentan bajas correlaciones para la banda cuartidiurna siendo menores a 0.25. Por otro lado, la corriente baroclínica de la banda semidiurna en el instrumento de fondo y en la primera celda del ADCP tiene correlaciones de 0.4 para A_{DC} . Esto sugiere que cerca del fondo las intensificaciones de U_{BF} podrían asociarse con el incremento de las corrientes baroclínicas.

III.2.3 Demodulación compleja en Canal de Ballenas

En el caso de CB-05, la inclinación promedio de las componentes de máxima variabilidad de la corriente observada y U_{BF} , es 125 y 128°, respectivamente, lo cual indica que ambas también son paralelas al eje del golfo. El análisis hecho en el umbral CB arroja resultados interesantes. Las correlaciones entre los parámetros de la DC para la banda semidiurna de las corrientes observadas y las corrientes de BF son relativamente altas cerca del fondo y de la superficie. La mayor correlación para ϕ_{DC} y U_{BF} , 0.55, se encuentra en la tercera celda del ADCP a 40 m PEF véase figura 21a. La intensificación de la corriente de BF asociada a incrementos de la fase de la corriente observada indica que cerca del fondo no existe un acoplamiento de las series.

En la figura 22 se observa como la correlación entre ambas series parece estar concentrada en las frecuencias más bajas. Esto se corrobora en la gráfica de coherencias, donde los únicos cuatro valores significativos corresponden a frecuencias relativamente bajas (figura 23). A pesar de las bajas velocidades registradas en el fondo de este umbral para U_{BF} , llama la atención, la modulación por parte de la corriente de BF en la fase, excepto en la

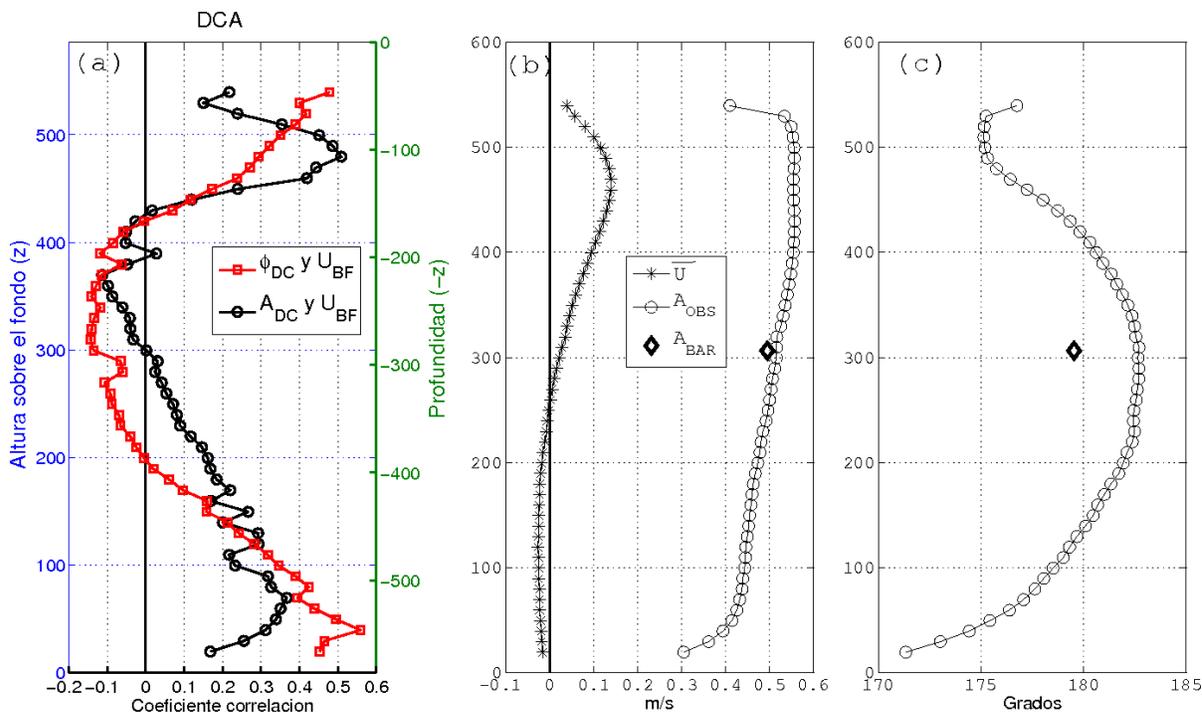


Figura 21. Correlación de la amplitud y fase de la demodulación compleja de la banda semidiurna de la corriente observada, con la corriente de baja frecuencia en CB-05 (a). Corriente promedio paralela al golfo (130°), así como amplitudes (b) y fases (c) de la componente M_2 de la corriente observada y barotrópica para la componente de máxima varianza de la corriente.

ultima parte de la serie (agosto-septiembre, 2006), así como el continuo cambio de sentido del flujo de U_{BF} .

En el caso de A_{DC} y U_{BF} la mayor correlación tiene lugar en los datos someros con 0.5 a 490 m PEF ó 100 m de profundidad. En la figura 24 se observa como el incremento y disminución de las velocidades de la corriente de BF en los periodos agosto-noviembre 2005, enero-mayo 2006, así como finales de junio-septiembre 2006 se relacionan con el aumento y disminución de la corriente de marea, respectivamente. También puede verse que las velocidades y valores de A_{DC} máximos (mayores a 35 cm/s y 1.1, respectivamente), al igual que las velocidades y valores de A_{DC} mínimos (-25 cm/s y 0.9, respectivamente), son simultáneos. En este caso, las mayores coherencias significativas también corresponden a bajas frecuencias, cuyos períodos son mayores a 25 días. Las fases correspondientes a dichas coherencias son cercanas a cero (figura 25).

La estructura vertical de la corriente promedio en CB es diferente a los demás, cerca

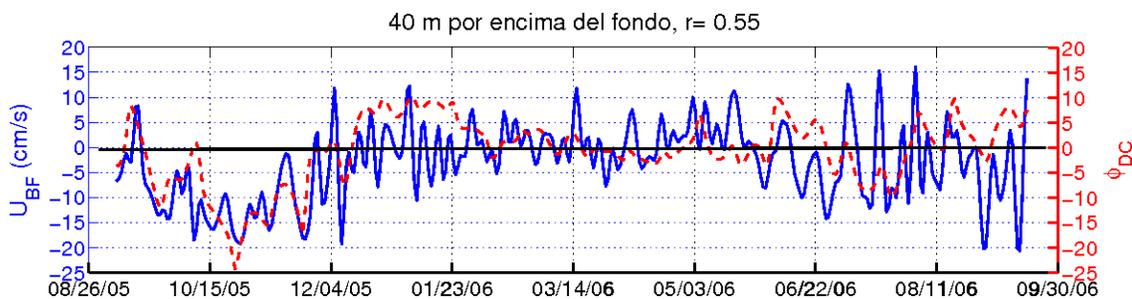


Figura 22. En rojo, ϕ_{DC} obtenido con demodulación compleja para la banda semidiurna de la corriente observada. En azul, serie de baja frecuencia. Ambas calculadas a 40 m PEF en el umbral CB-05

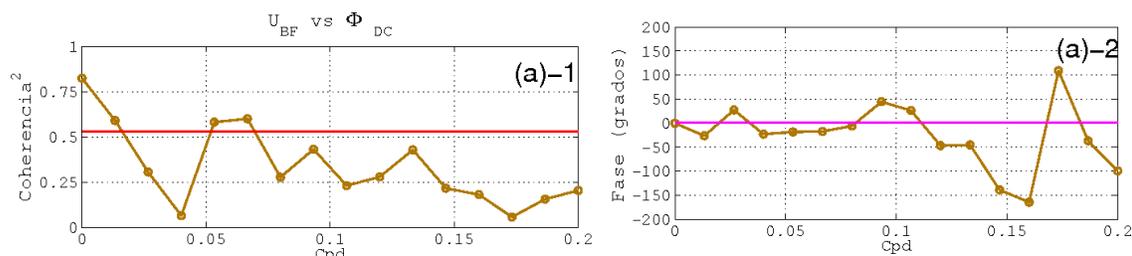


Figura 23. Coherencias y fases correspondientes a las series presentadas en la figura 22.

del fondo (figura 21b) existe un flujo saliente en dirección a la boca del golfo, mientras que cerca de la superficie el flujo es entrante y en dirección a la cabeza. Las velocidades más altas de la corriente observada se localizan precisamente en la región somera, donde el flujo medio presenta también sus mayores velocidades. Cerca del fondo, la corriente promedio profunda es débil y fluye en sentido contrario a la corriente, y la fase presenta una reducción de los primeros 200 m respecto al fondo (figura 21c), dicha reducción es menor a la de SL.

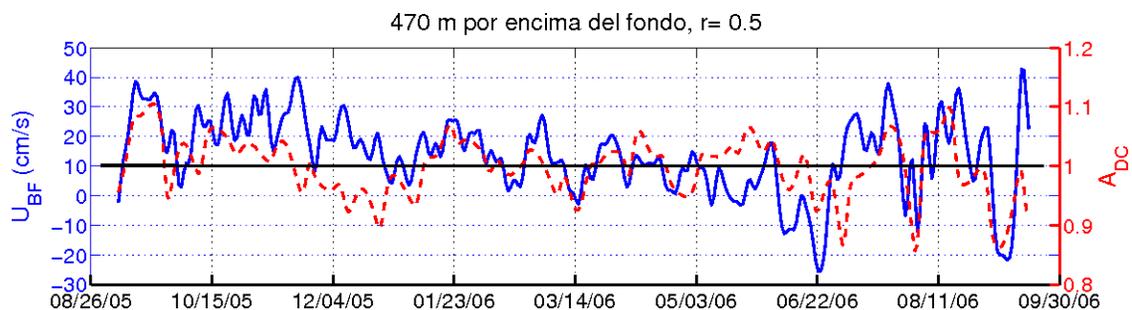


Figura 24. En rojo, la amplitud A_{DC} obtenida con demodulación compleja para la banda semidiurna de la corriente observada y en azul la corriente de BF. Ambas calculadas a 470 m PEF en el umbral CB-05.

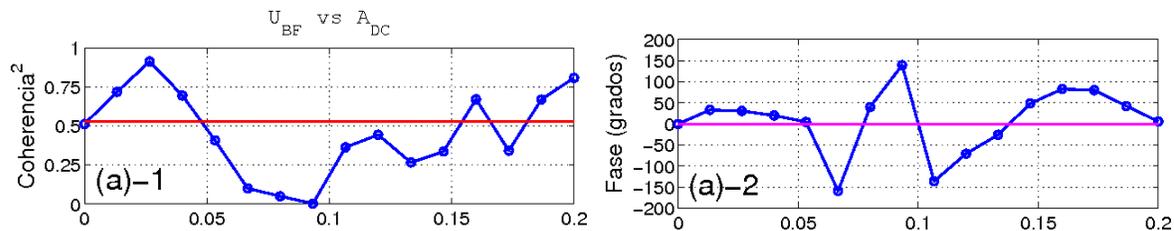


Figura 25. Coherencias y fases correspondientes a las series presentadas en la figura 24 .

Demodulación compleja de la banda cuartidiurna y banda semidiurna de la corriente baroclínica

Respecto a la correlación con las corrientes de marea de la banda cuartidiurna y baroclínica, se observaron en el caso de la primera, correlaciones entre 0.4 y 0.47 para ϕ_{DC} entre 100 y 200 m PEF, siendo estas últimas las más altas. Por su parte, las corrientes baroclínicas presentaron las mayores correlaciones en los datos someros pero menores a 0.3 por lo que no se puede atribuir un efecto importante por parte de las corrientes de BF.

III.3 Variaciones de la temperatura cerca del fondo

Se encontró una correlación de -0.53 entre la componente de máxima varianza de la corriente de marea y la serie de temperatura ambas registradas lo más próximo al fondo, en SL-03 (figura 26a) por un correntímetro tipo argonauta y un microcat. La función de correlación entre ambas series presenta un valor máximo, para un desfase de -3 horas (figura 26b). Esto indica que la corriente máxima hacia la cabeza del golfo antecede a la mínima temperatura, por tres horas. Este desfase indica que la mínima temperatura se alcanza cuando termina el flujo de marea (corriente hacia la cabeza del golfo) y se alcanza la máxima temperatura cuando termina en el reflujó de marea (corriente hacia la boca del golfo). Dicha correlación se encontró para series de 547 días de duración, en la figura 26 se observa sólo unos segmentos superpuestos de las series.

En los umbrales DE y CB no se observa este comportamiento, las correlaciones encontradas para cada uno son -0.31 y 0.10. Es interesante notar que en el umbral SE se presenta una correlación de -0.57, similar a la de SL. Las series de corriente y temperatura

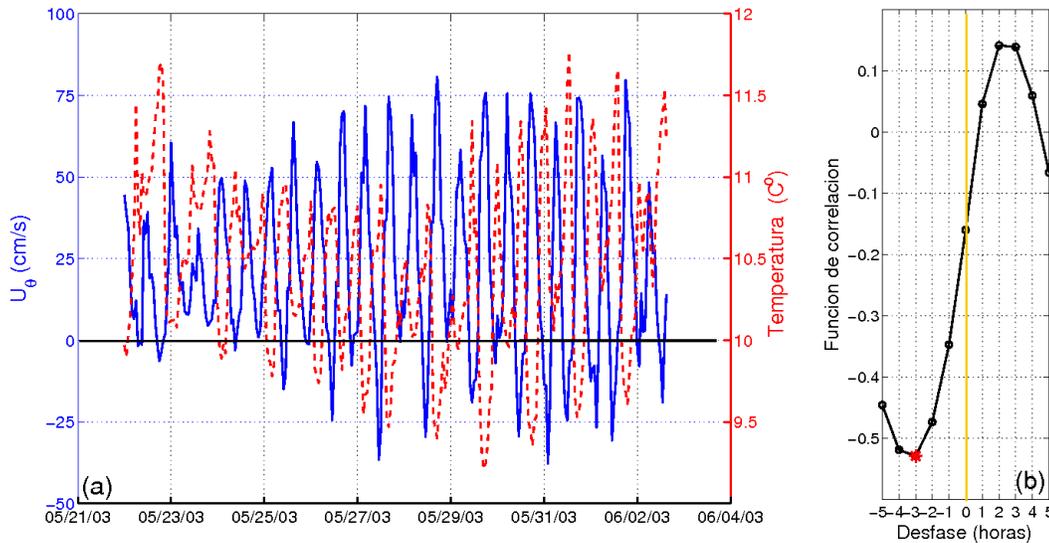


Figura 26. (a) Segmento de aproximadamente 15 días de la serie de velocidad (componente de máxima varianza, orientada a 144° respecto al Este) y la temperatura en SL-03. Esta última, está desplazada tres horas a la izquierda. Ambas series están a 8 m PEF, los valores positivos y negativos de la velocidad indican flujo y reflujos de la marea, respectivamente. (b) Función de correlación indicando el desfase correspondiente a la correlación máxima de ambas series.

en SE se registraron en la primera celda del ADCP y en un microcat próximo, véase figura 27a, en este caso la CM hacia la cabeza del golfo antecede únicamente por una hora a la temperatura mínima (figura 27b).

Los resultados de las correlaciones se corroboraron mediante análisis armónico de las dos series de corrientes más próximas al fondo y las correspondientes series de temperatura. Con dicho análisis obtuvimos el eje mayor (M), amplitud (A) y fases (Φ) así como la razón señal a ruido (RSR) y las diferencias de fase entre corriente y temperatura (véase tabla V). Los desfases encontrados indican que en SL la corriente máxima antecede al mínimo de la temperatura por periodos que van de 3.2 a 3.6 horas para las componentes M_2 y S_2 . Para las mismas componentes el desfase en SE varía entre 1 y 2 horas, siendo mayor para la componente S_2 . Al igual que para las corrientes, la componente más energética para la temperatura es la M_2 . Sin embargo, a diferencia de las corrientes, la S_2 para la temperatura es la tercera y cuarta componente más energética en SE y SL, respectivamente.

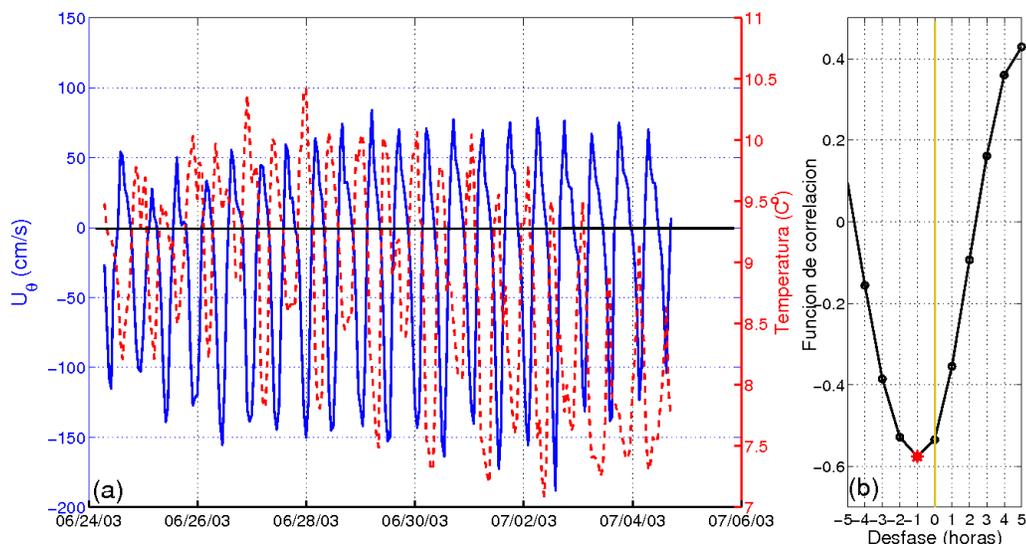


Figura 27. Igual a la figura 26, pero en SE-03, donde la componente de máxima varianza esta orientada a 154° respecto al Este) y la temperatura esta desplazada una hora a la izquierda. (a) Ambas series a ~ 35 m PEF . (b) Función de correlación correspondiente

Tabla V. Análisis armónico de la corriente de marea observada y la temperatura en los umbrales SL-03 y SE-03, así como el desfase entre el valor máximo de la corriente y mínimo de la temperatura (horas). Las series analizadas corresponden a las más próximas al fondo en cada umbral.

Umbral	Armónico	M_{OBS}	Φ_{OBS} ($^\circ$)	SNR_{OBS}	A_T	Φ_T ($^\circ$)	SNR_T	$\Delta\Phi$
SL-03 Argonauta	M_2	29	181.8	1199	0.32	104.1	72.5	3.53
	S_2	17.4	183.93	383	0.20	111.79	51.41	3.60
SL-03 ADCP	M_2	37	188.5	1570	0.37	102.4	98.4	3.3
	S_2	21.8	190.38	476	0.22	107.29	34.4	3.23
SE-03 Aandera	M_2	52	174.58	693	0.52	27.6	357	1.14
	S_2	35	176.91	345	0.31	43.52	149	1.55
SE-03 ADCP	M_2	57	177.87	942	0.53	42.37	410	1.03
	S_2	38.041	179.81	345	0.31	59.98	141	2.01

IV

Discusión

El objetivo de este trabajo es estudiar la estructura vertical de las corrientes de marea e identificar como son afectadas por las corrientes de baja frecuencia. La zona de estudio son los umbrales del archipiélago ubicado al norte del GC. Esta área se caracteriza por altas corrientes de marea (Marinone, S.G. and M.F. Lavín, 2005) que se intensifican en el archipiélago debido a la compleja batimetría que presenta (Lavín y Marinone, 2003). Cabe mencionar, que la oceanografía de la zona se encuentra enriquecida por intensos flujos de corriente de baja frecuencia (López *et al.*, 2008) y por el hecho de que los umbrales SE, SL y CB son conocidos como lugares generadores de marea interna (Fu y Holt, 1984). A partir de la corriente de marea registrada se definió a la corriente barotrópica y baroclínica, cuyas escalas espaciales difieren en aproximadamente dos ordenes de magnitud. Por ejemplo, una idea de las escalas de la marea barotrópica y baroclínica en el umbral SL la podemos obtener a partir de las longitudes de onda respectivas. Suponiendo que la marea barotrópica se propaga como una onda de Kelvin y tomando la profundidad de 400 m, se obtiene una longitud de onda de ~ 2800 km. En el caso de las mareas baroclínicas, una estimación de la longitud de onda se puede obtener suponiendo que las ondas corresponden al primer modo baroclínico de una onda de Poincaré. En ese caso la longitud de onda esta dada por

$$\lambda = \frac{2\pi c_1}{\sqrt{\omega^2 - f^2}}; \quad (21)$$

donde c_1 es la velocidad de fase del primer modo baroclínico, ω es la frecuencia y f es el parámetro de Coriolis. Utilizando datos hidrográficos de tres cruceros en épocas diferentes del año, se estimó c_1 y con ello la longitud de onda de la marea baroclínica M_2 (ver tabla VI). Nótese que la longitud de onda puede variar significativamente en las diferentes épocas del año, siendo más grande en el verano cuando la estratificación es más fuerte.

Tabla VI. Velocidades de fase y longitudes de onda de la marea baroclínica, para distintos cruceros en el año .

Crucero	c_1 (m/s)	λ (km)
Marzo - 2002	0.47	25
Mayo - 2003	0.76	35
Septiembre - 2005	1.20	62

Análisis armónico

Las frecuencias semidiurnas son dominantes en el archipiélago, en especial la constituyente M_2 , a esta frecuencia el eje mayor de la elipse de la corriente barotrópica, indica que las velocidades máximas de la corriente de marea son 0.56, 0.51, 0.49 y 0.24 m/s en los umbrales SE, SL, CB y DE, respectivamente (figura 5). A partir de las fases de la corriente barotrópica y de la presión subsuperficial (PSS) obtenidas con el análisis armónico, se calculó una diferencia de fase que nos indica la relación entre ambas series en los umbrales. En aquellos localizados al norte del archipiélago (CB y DE), se encuentra un desfase $\sim 90^\circ$ que concuerda con la descripción de la marea en un golfo de dimensiones como las del GC sin fricción, la cual corresponde a una onda estacionaria de Kelvin (Hendershott y Speranza, 1971; Godin, 1988) y (Ortíz-Figueroa, comunicación personal). Mientras tanto en los umbrales del sur (SE y SL) el desfase decrece a $\sim 60^\circ$ (Tabla IV). Los desfases indican que la corriente de marea (CM) hacia la cabeza del golfo, la cual antecede al máximo de la PSS, se ve retrasada en los umbrales del sur, razón por la cual la diferencia de fase disminuye.

La disminución en el desfase entre las corrientes y la PSS en los umbrales del sur, se puede deber a fenómenos de disipación locales o a los que afectan a la onda estacionaria de marea en toda la cuenca. Con fricción de fondo, disminuye el desfase de 90° entre corrientes y PSS, pero dicha disminución no es uniforme en todo el golfo. Eso se ilustra de manera sencilla, en la solución para una onda estacionaria unidimensional con fricción y sin rotación (Godin, 1988). En dicha solución, la disminución del desfase entre corrientes y nivel del mar es más pronunciada en puntos cercanos al nodo del nivel del mar y tiende a 90° en puntos más alejados en dirección a la cabeza del golfo. En el GC, el punto anfodrómico virtual está en la zona de Santa Rosalía (Morales y Gutiérrez, 1989) y

por lo tanto los umbrales del sur se encuentran mas cercanos a dicho punto.

Por otro lado, las corrientes cuartidiurnas y baroclínicas semidiurnas mas fuertes se encontraron en los umbrales del sur (figuras 6 y 7). Estas corrientes están asociadas a ondas no lineales que tienden a producir fenómenos disipativos tales como saltos hidráulicos y rompimiento de ondas internas (Paden *et al.*, 1991; Fu y Holt, 1984). Además, la corriente de baja frecuencia cerca del fondo en SL, también parece estar asociada a la disminución significativa de la fase de la M_2 en esa parte de la columna de agua (figuras 5 y 14). Todos estos fenómenos locales también podrían estar contribuyendo a una disminución más pronunciada de la fase de las corrientes de marea y, por tanto, a una disminución de la diferencia de fase con la PSS en los umbrales del sur.

La estructura vertical revelada por el AA para el armónico M_2 (figura 5) indica que los mayores valores de las corrientes, se encuentran a 100 m PEF en SE, a media columna en SL y cerca de la superficie en DE y CB, éste último presenta una intensificación más drástica que DE. Las fases de CB y SE indican que la corriente máxima ocurre de manera casi simultánea en toda la columna de agua, caso contrario a DE y SL donde la corriente se encuentra adelantada (ocurre antes) cerca del fondo. En el caso de SL, también hay una disminución significativa de la fase hacia la superficie y de hecho las corrientes máximas ocurren antes que en cualquier otro punto de la columna de agua. La estructura del eje mayor y de la fase cerca del fondo tienen cierta semejanza cualitativa con una capa de Ekman para una marea barotrópica y para un coeficiente de intercambio turbulento (A_V) constante. En casi todos los casos, el eje mayor y la fase tienden a disminuir cerca del fondo. La figura (28) muestra la capa de Ekman para una corriente barotrópica junto con el eje mayor y la fase en SL. En ambos casos se buscó el A_V que minimizara el error cuadrático medio cerca del fondo arrojando valores relativamente altos de $0.14 \text{ m}^2/\text{s}$ para el eje mayor y $0.03 \text{ m}^2/\text{s}$ para la fase. Sin embargo, es claro que una capa de Ekman barotrópica y con A_V constante no puede explicar ni física, ni cuantitativamente el comportamiento de las corrientes de marea cerca del fondo en los umbrales del GC. Por un lado, la disminución mucho más pronunciada de la fase cerca del fondo en SL y DE relativa a los otros dos umbrales, y del eje mayor en SL, sugieren que las corrientes de

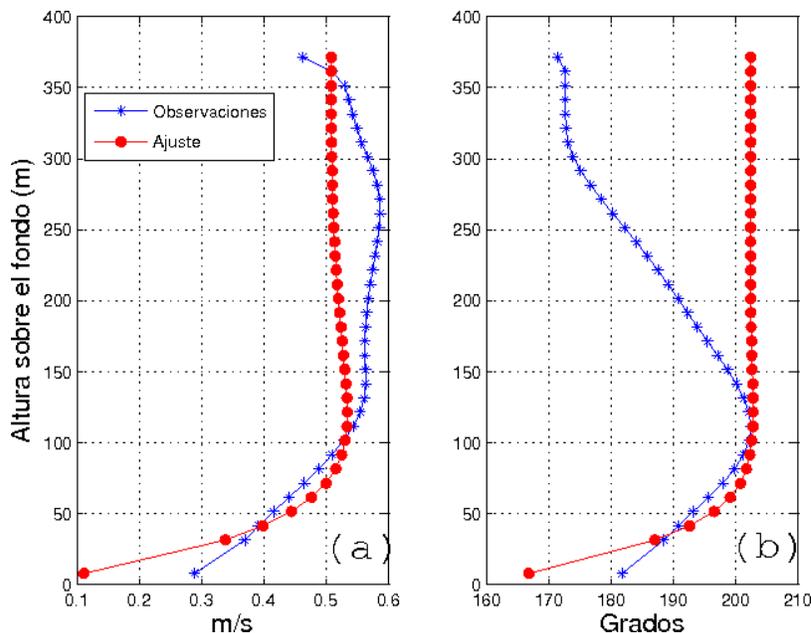


Figura 28. (a) Eje mayor de las corrientes observadas en SL-03 y de un ajuste a una capa de Ekman con coeficiente de intercambio turbulento (A_v) constante e igual $0.14 \text{ m}^2/\text{s}$. (b) Igual que (a) pero para la fase y con un $A_v = 0.03 \text{ m}^2/\text{s}$.

baja frecuencia relativamente intensas y con un corte vertical apreciable (ver figura 29), presentes *exclusivamente* en estos dos umbrales está afectando a la estructura vertical de las corrientes de marea en esa zona. Por otro lado, la presencia de mareas baroclínicas semidiurnas (figura 7) y de mareas cuartidiurnas (6 y figuras 40, 41 y 42 del apéndice C) apreciables, apuntan a que fenómenos no lineales y baroclínicos están afectando la estructura vertical de las corrientes a la frecuencia M_2 en todos los umbrales del GC y sobre todo cerca del fondo.

En los umbrales, las corrientes de marea contribuyen en gran medida a las corrientes observadas. Una característica importante de las corrientes a frecuencia de marea es que pueden considerarse, a primera aproximación, como barotrópicas. Los altos valores de la razón de la varianza, de la corriente barotrópica para M_2 lo confirman (figura 10a). Las corrientes baroclínicas por otro lado, presentan una razón de varianza alta cerca del fondo y de la superficie, haciendo que la suma de las varianzas de las corrientes barotrópicas y baroclínicas sea mayor al 100%. Esto implica covarianzas negativas entre la corriente

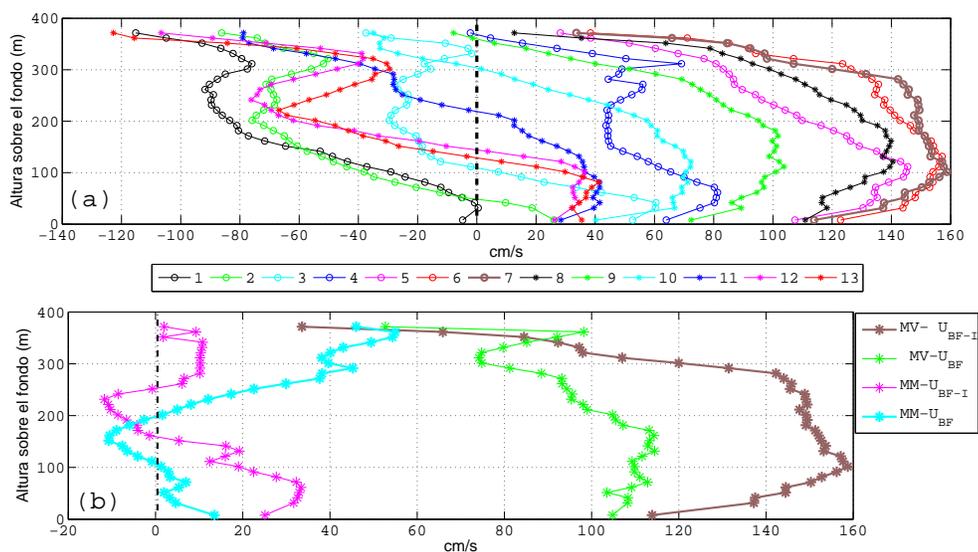


Figura 29. (a) Perfiles verticales horarios de la corriente observada durante mareas vivas e intensa corriente de baja frecuencia. Los números corresponden a las trece horas que tarda un ciclo semidiurno de la M_2 , las horas uno y siete corresponden al refluo y flujo de la marea, respectivamente. Las velocidades > 0 indican un flujo con dirección a la cabeza del golfo y viceversa. (b) Perfiles verticales de marea a la hora siete, para distintas condiciones de marea y corriente de baja frecuencia. MV indica marea viva, MM marea muerta y U_{BF-I} corriente de baja-frecuencia intensa.

Tabla VII. Valores máximos y mínimos para M_2 de M_{OBS}/A_{BAR} , así como diferencias de fase $\phi_{BAR} - \phi_{BCL}$, razones A_{BCL}/A_{BAR} , y distancias por encima del fondo, correspondientes.

<i>Umbral</i>	<i>Valor máximo M_{OBS}/A_{BAR}</i>	$\phi_{BCL} - \phi_{BAR}$	A_{BCL}/A_{BAR}	Z
SE	1.17	-12°	0.17	85 m
SL	1.15	-43°	0.20	261 m
CB	1.14	-28°	0.16	504 m
DE	1.24	-17°	0.25	315 m
	<i>Valor mínimo M_{OBS}/A_{BAR}</i>			
SE	0.85	216°	0.18	535 m
SL	0.57	186°	0.43	8 m
CB	0.67	190°	0.33	55 m
DE	0.86	139°	0.18	85 m

barotrópica y baroclínica, principalmente en SE, DE y SL. Este resultado sugiere que las intensificaciones estacionales de la corriente baroclínica, tienden a disminuir a la corriente barotrópica especialmente cerca del fondo y superficie.

El efecto de la corriente baroclínica sobre la estructura de la corriente observada ha sido estudiada por Bruno *et al.* (1999b) y Jiménez Lagunes (2003). Este último sugiere que como la amplitud de las corrientes totales cerca de la superficie (fondo) es mayor (menor) que la amplitud de la corriente barotrópica; las corrientes baroclínicas serían responsables de aumentar cerca de la superficie (reducir cerca del fondo) a la corriente M_2 barotrópica. La intensificación de la corriente cerca de la superficie se observa en DE, CB, ligeramente en SL pero no en SE.

La estructura vertical de la corriente puede explicarse considerando la suma constructiva y destructiva de la corriente barotrópica y baroclínica, (ecuación 18 y figura 8). En la tabla VII se observan los valores máximos y mínimos de la corriente observada, los desfases entre las corrientes que la conforman así como los valores de la corriente baroclínica correspondientes. La diferencia de fase entre la corriente barotrópica y baroclínica indican que las mayores intensificaciones de la CM ocurren con desfases cuyo valor absoluto va de 10° a 40° . Por el contrario, los valores mínimos están relacionados con desfases con valores absolutos mayores a 130° y a altos valores de la corriente baroclínica. Cabe mencionar que estas últimas corrientes son más fuertes en el fondo de DE, SL y CB (figura 9).

Demodulación compleja

Se ha encontrado que la amplitud y fase de la marea en los umbrales del GC experimentan fluctuaciones de baja frecuencia. Uno de los mecanismos mediante los cuales la corriente de baja frecuencia, U_{BF} , afecta a la amplitud y fase de las corrientes de marea es mediante los términos no lineales en la ecuación de momento (Bruno *et al.*, 1999a). Si escribimos la corriente total a lo largo del golfo (dirección x) como $u = U_{BF} + U_M$ donde U_M es la corriente de marea, entonces dos términos potencialmente importantes son (Bruno *et al.*, 1999a).

$$U_{BF} \frac{\partial U_M}{\partial x} + U_M \frac{\partial U_{BF}}{\partial x} . \quad (22)$$

Es de esperarse que el primer término afecte fundamentalmente a las corrientes baroclínicas ya que

$$\frac{\partial U_M}{\partial x} \sim ikU_M \quad (23)$$

donde k es el número de onda correspondiente. Para la marea barotrópica M_2 a unos 800 m de profundidad, (aproximadamente la profundidad promedio del GC) $k = 1.6 \times 10^{-6} m^{-1}$, mientras que para la longitud de onda más grande del primer modo baroclínico (ver tabla VI), $k = 1.0 \times 10^{-4} m^{-1}$. Es interesante notar que tomando los valores extremos de las longitudes de onda que aparecen en la tabla VI, y un valor de $U_M \approx 0.2 ms^{-1}$ (por abajo del máximo de la corriente media observada en SL) se obtiene que kU_M varía del 15 al 37% de la frecuencia M_2 . El segundo término también es factible que afecte fundamentalmente a las corrientes baroclínicas ya que las escalas de la corriente de baja frecuencia son relativamente cortas (del orden de la distancia del umbral a la parte más profunda de la cuenca que está al noroeste del umbral) comparadas con la escala de la onda de la marea barotrópica. Tanto la amplitud como la fase de las corrientes observadas de la M_2 , están negativamente correlacionadas con U_{BF} cerca del fondo (figura 11). Por otro lado, la fase de las corrientes baroclínicas están correlacionadas positivamente con U_{BF} a la misma distancia del fondo que para las corrientes observadas (figura 16). Este comportamiento de la fase es consistente con el hecho de que las corrientes barotrópicas y baroclínicas se suman destructivamente cerca del fondo en SL (figura 9). Es decir, un

aumento de la fase de la corriente baroclínica cerca del fondo provocará que el desfase entre corrientes baroclínicas y barotrópicas esté aún más lejos de $\sim \pm 100^\circ$ y por tanto la suma destructiva provocará una amplitud menor de la corriente observada. En el punto más cercano al fondo, la correlación positiva de la amplitud de la corriente baroclínica con U_{BF} (figura 16) también es consistente con este comportamiento, ya que al sumarse destructivamente las corrientes barotrópicas y baroclínicas, un aumento en la amplitud de estas últimas debe provocar una disminución de la amplitud de las corrientes observadas.

En el umbral DE, la fase de las corrientes observadas también está correlacionada negativamente con la corriente de baja frecuencia (figura 19), sin embargo en este umbral no hay buena correlación con la amplitud. El hecho de que las corrientes de baja frecuencia estén mejor correlacionadas con la variación de la fase es algo que también encontró Bruno *et al.* (1999a) en el estrecho de Gibraltar.

Otro posible mecanismo mediante el cual la corriente de baja frecuencia (U_{BF}) puede afectar a la estructura vertical y a las variaciones temporales de la amplitud y la fase de las corrientes de marea es a través de la disipación turbulenta inducida por la U_{BF} . Las corrientes de baja frecuencia en los umbrales de SL y DE están asociadas a una corriente de densidad que desciende desde el umbral hasta las partes profundas de las cuencas del Canal de Ballenas y de Delfín, respectivamente. Ambas corrientes están concentradas cerca del fondo y presentan un corte vertical significativo (figura 30).

La disminución significativa de la fase de las corrientes de marea en estos dos umbrales cerca del fondo (figura 5d) es ciertamente consistente con una disipación mayor en esa zona. El efecto de las corrientes unidireccionales de baja frecuencia cerca del fondo en los umbrales de SL y DE sobre el perfil de las corrientes totales, consiste en que el corte es más intenso en la región de estas corrientes. Este incremento en el corte vertical se puede apreciar en la figura (29a) donde se muestran los perfiles horarios de las corrientes observadas sobre un ciclo semidiurno de marea. El corte vertical parece ser más intenso durante el reflujo de la marea (horas 1 a 3 y 11 a 13). El incremento del corte debido a la U_{BF} también es evidente en los perfiles del flujo de la marea para mareas vivas y muertas y para condiciones en las que la U_{BF} es intensa o débil (figura 29b). Cuando la U_{BF} es

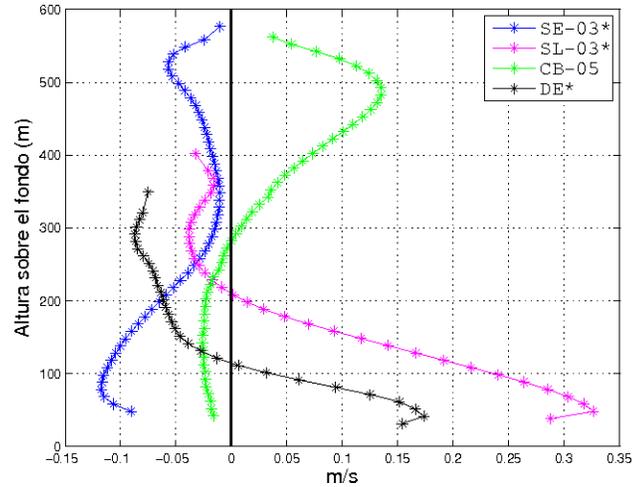


Figura 30. Flujo promedio paralelo al golfo de la corriente, este se encuentra rotado 137, 146, 130 y 125° respecto al Este en los umbrales SE, SL, CB y DE, respectivamente. Velocidades positivas (negativas) indican un flujo hacia la cabeza (boca) del golfo

mas intensa, el corte tiende a ser mayor. Evidencia adicional de que la turbulencia tiende a aumentar hacia el fondo por la presencia de la U_{BF} , se encontró al hacer una estimación de la evolución temporal del número de Richardson

$$Ri = \frac{N^2}{(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2} , \quad (24)$$

en tres profundidades diferentes. Para esta estimación se utilizaron los datos de 2 microcats instalados en un anclaje cercano al anclaje de SL durante 2002-2003 (anclaje MCAT SL en la figura 2), junto con el microcat que estaba a ~ 9 m del fondo en el anclaje del ADCP (anclaje ADCP SL en la figura 2). Los tres microcats permitieron la estimación directa de N^2 en las dos profundidades intermedias entre los tres microcats. Además, interpolando estos valores de N^2 en una profundidad intermedia donde el corte vertical promedio de la corriente de fondo es máxima, también se estimó Ri a esa profundidad. El corte vertical se obtuvo de los datos del ADCP y del correntímetro cercano al fondo. La series de tiempo de Ri se muestran en la figura 31 y se puede observar que los valores de Ri tienden a disminuir en las profundidades más cercanas al fondo. La línea roja en esta figura indica $Ri = 1/4$ y se muestra nada más como una guía para indicar el valor mínimo para el cual un flujo estratificado estacionario con corte vertical se hace inestable a perturbaciones pequeñas (Kundu y Cohen, 1990). La figura (32a) muestra Ri como función de las fluctuaciones de

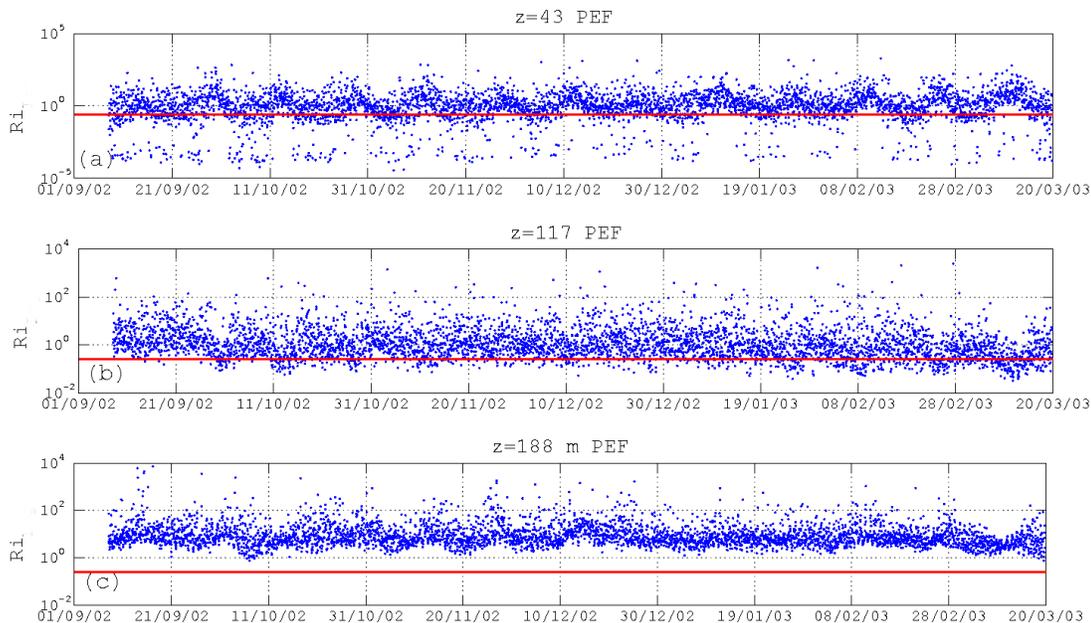


Figura 31. Series de tiempo del número de Richardson grafico en escala logarítmica a distintas profundidades. (a) Serie cercana al fondo con valores de $Ri \leq 1/4 = 1052$, (b) serie en zona de mayor corte vertical valores de $Ri \leq 1/4 = 646$ y (c) serie más somera con valores de $Ri \leq 1/4 = 0$, los valores por debajo de la línea roja son menores a $1/4$.

la velocidad (u') a 40 m PEF. Esta última variable es un mejor indicativo de la fase de la marea, ya que la corriente total es generalmente positiva y tiene pocas inversiones a esa profundidad. Esta figura muestra que los valores de Ri tienden a ser menores durante el flujo de la marea ($u' > 0$) que durante el reflujo ($u' < 0$). La figura (32b) muestra una figura similar pero para N^2 y se puede observar que la estratificación es más débil durante el flujo que durante el reflujo de la marea, consistente con que Ri también es menor durante ese ciclo de la marea. El hecho de que la estratificación es mayor durante el reflujo de la marea podría deberse a que en la columna de agua, U_{BF} es más intensa cerca del fondo y por lo tanto la corriente se invierte antes hacia la boca del golfo en los puntos más alejados del fondo (ver perfiles de las horas 1 a 3 y 12 y 13 en la figura 29a. Así que tenemos agua fluyendo hacia la cabeza del golfo cerca del fondo y hacia la boca en puntos más alejados del fondo. Cabe mencionar que en muchas ocasiones las corriente cerca del fondo no se invierte.

De hecho, por la mezcla de la corriente de fondo al pasar por el umbral, el agua proveniente del lado noroccidental del umbral (del lado de la cabeza del golfo) es menos

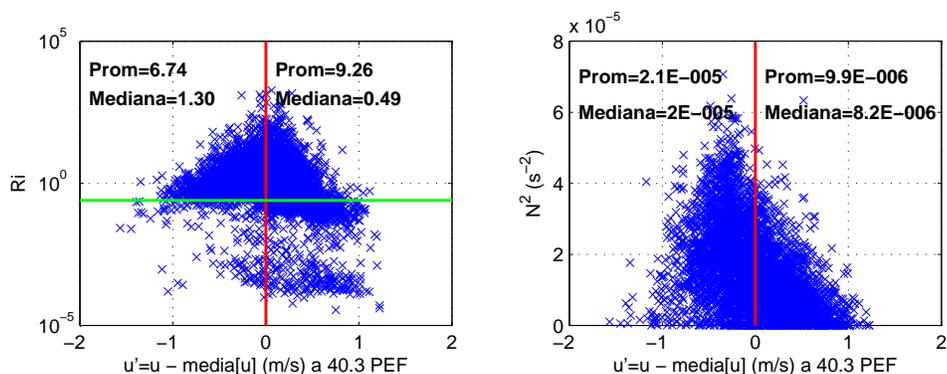


Figura 32. (a) Número de Richardson a 40 m por encima del fondo como función de las fluctuaciones de la corriente (corriente sin la media) a esa misma profundidad. El promedio y la mediana, se refieren a los valores asociados a las fluctuaciones positivas y negativas. La línea verde marca el valor $Ri = 1/4$ (b) Igual que (a) pero para el cuadrado de la frecuencia de Brunt-Vaisala.

densa que el agua correspondiente al lado suroriental del umbral (del lado de la boca del golfo) a la misma profundidad (ver figura 33a). Durante el reflujó de la marea tenemos que agua relativamente más caliente fluye sobre agua relativamente mas fría, provocando una mayor estratificación que durante el flujo de la marea.

Variación de la temperatura cerca del fondo.

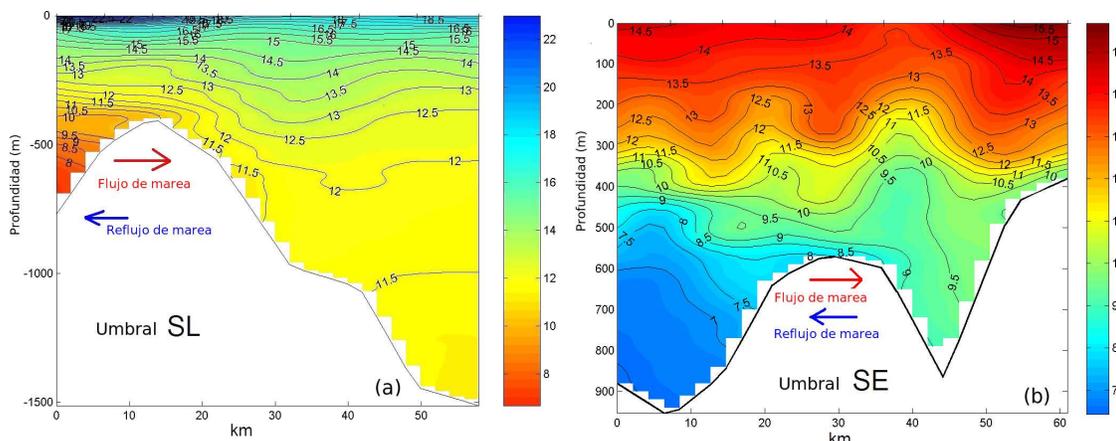


Figura 33. Temperatura longitudinal a lo largo de los umbrales SL (a) y SE (b). Estas secciones están orientadas de *SE* a *NW* y corresponden a un día de mayo del 2003 (28-29 de mayo en el caso de SL).

El retraso de 3 horas de la temperatura mínima con respecto al máximo de la

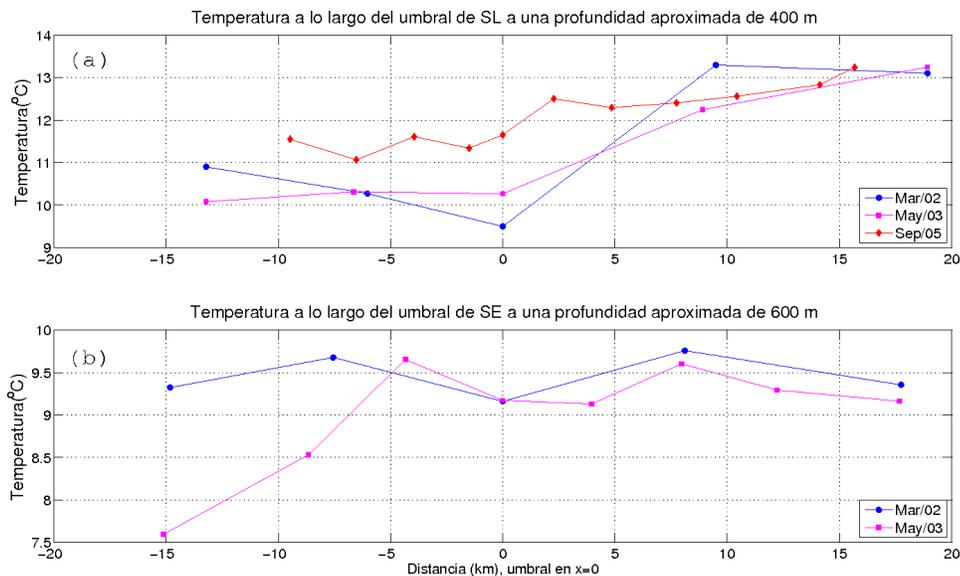


Figura 34. (a) Temperatura a lo largo del umbral de SL. Todos los puntos son el promedio de los 10 valores más cercanos a la profundidad del umbral, aproximadamente 400 m (b) Igual que (a) pero para el umbral de SE a una profundidad aproximada de 600 m.

corriente del flujo de la marea en el umbral de SL es consistente con el gradiente horizontal de temperatura que existe a través del umbral. Dicho gradiente se observa en la figura 33a y se puede ver que a distancias relativamente cortas del orden de 10 km a ambos lados del umbral, ya existen temperaturas más alta del lado derecho (nor-occidental) y más frías del lado izquierdo (suroriental). Este gradiente se pudo observar en tres cruces distintos realizados en diferentes estaciones del año en el umbral de SL (figura 34a). La excursión de la marea debido a la acción combinada de las componentes M_2 y S_2 en el fondo del umbral de SL es de aproximadamente 9 km. Por lo tanto, el transporte de agua más fría durante el flujo de la marea y de agua más caliente durante el reflujó podría ser la causa del desfase encontrado. En contraste, en el umbral de SE hay un gradiente horizontal de temperatura mucho menos pronunciado (figuras 33b y 34b). En este umbral el retraso de la temperatura mínima con respecto al máximo de la corriente del flujo de la marea es de aproximadamente 1 hora. Este comportamiento casi simultáneo entre corriente máxima del reflujó de la marea y temperatura mínima es más consistente con variaciones de temperatura debidas a movimientos verticales de las isotermas, hacia arriba durante el flujo de la marea y hacia abajo durante el flujo. Este comportamiento también

es consistente con el transporte por bombeo de mareas encontrado en este umbral. De acuerdo a este transporte, más agua profunda entra durante el flujo de la marea debido al levantamiento de las isopícnas y menos agua sale durante el reflujó debido al hundimiento de las isopícnas (López *et al.*, 2006).

V

Conclusiones

Se analizaron las corrientes de marea en cuatro umbrales de la parte norte del Golfo de California utilizando análisis armónico y demodulación compleja. Las componentes más energéticas en todos los umbrales son las semidiurnas que en orden descendente son M_2 , S_2 y N_2 . La cuarta componente en importancia es la K_1 , pero en SE cerca del fondo, las componentes cuartidiurnas (M_4 y MS_4) y la quincenal (MSF) son mayores que K_1 con valores del orden de 0.1 ms^{-1} , indicando la importancia de interacciones no lineales en ese umbral. En SL, las componentes cuartidiurnas también son significativas cerca del fondo alcanzando ambas valores de unos 0.05 ms^{-1} . En ambos umbrales, las componentes cuartidiurnas tienen una estructura baroclínica. En DE las componentes quincenal y la anual cerca del fondo, también son mayores que la K_1 . Sin embargo, la componente anual en DE probablemente esté relacionada al ciclo anual de la corriente de baja frecuencia cercana al fondo y no a un forzamiento astronómico.

La magnitud y estructura vertical de las corrientes de marea presenta diferencias significativas en los cuatro umbrales. Las corrientes más fuertes de la componente M_2 ($\sim 0.65 \text{ ms}^{-1}$) se presentaron en el umbral de SE cerca del fondo, seguidas por las corrientes en la mitad superior de la columna de agua en los umbrales de SL ($\sim 0.58 \text{ ms}^{-1}$) y CB ($\sim 0.55 \text{ ms}^{-1}$). Las corrientes más débiles se encontraron en el umbral de DE con valores máximos del orden de 0.3 ms^{-1} cerca de la superficie. Las corrientes en el umbral de SL decrecen hasta la mitad de su máximo valor en los 100 m inferiores de la columna de agua. Los ejes mayores de las elipses están bien alineadas con el eje del golfo en el umbral de CB y rotadas un poco más hacia el oeste en los otros tres umbrales. Todas las fases decrecen cerca del fondo, pero las fases en los umbrales de SL y DE decrecen como $\sim 20^\circ$ (40 minutos de adelanto) y 30° (1 hora de adelanto), respectivamente. La variación vertical de las corrientes de marea se explica en términos de la suma constructiva y destructiva

de las corrientes barotrópica y baroclínica. Cuando el desfase entre estas dos corrientes es menor a 100° , las corrientes barotrópica y baroclínicas se suman constructivamente. Las corrientes baroclínicas más intensas se encuentran en los umbrales de SE y SL, en este último umbral alcanzando casi $\sim 0.2 \text{ ms}^{-1}$ a unos 100 m del fondo.

Las variaciones temporales de la fase y la amplitud de la M_2 en SL y DE están significativamente correlacionadas con las corrientes de baja frecuencia cercanas al fondo en esos dos umbrales. Un aumento de las corrientes de baja frecuencia está asociado a una disminución de la amplitud y la fase. La fase de las corrientes de marea baroclínicas presentan una correlación positiva (~ 0.6) con la corriente de baja frecuencia en SL y esto es consistente con la correlación negativa de la misma corriente de baja frecuencia con la amplitud de las corrientes de marea totales. Al aumentar la fase de las corrientes baroclínicas, aumenta el desfase entre éstas últimas y la corriente barotrópica, lo cual aumenta la suma destructiva de estas dos corrientes. En el umbral de SL, se estimó una longitud de onda de las mareas baroclínicas entre 25 (invierno) y 62 km (verano). Utilizando estas escalas y valores representativos de la corriente de baja frecuencia cerca del fondo, se estimó que el término de advección debido a la corriente media es del orden de 15 a 37% del término de aceleración local de las corrientes baroclínicas.

En el umbral del CB también se encontró una correlación significativa entre las corrientes de baja frecuencia con la amplitud de la marea M_2 cerca de la superficie y con la fase cerca del fondo. En ambos casos la correlación fue positiva de tal manera que una intensificación de la corriente de baja frecuencia hacia la cabeza del golfo está relacionada a un aumento de la amplitud y de la fase de las corrientes de marea. En este umbral, las corrientes de baja frecuencia más fuertes se encuentran cerca de la superficie, pero el efecto sobre la amplitud es el contrario al hallado en SL cerca del fondo. Dado que en este umbral la correlación entre la corriente de baja frecuencia y la demodulación compleja de amplitud y fase de las corrientes baroclínicas fue baja, no se tiene una posible explicación a las correlaciones de amplitud y fase de las corrientes totales con la corriente de baja frecuencia.

En el umbral de SL, se encontró que el número de Richardson aumenta hacia el fondo, lo

cual es consistente con una mayor disipación en esa parte de la columna de agua. Además, se encontró que, tanto la estratificación como el número de Richardson cerca del fondo, tienden a ser menores durante el flujo de la marea, sugiriendo que la disipación turbulenta es mayor durante ese ciclo de la marea. La mayor estratificación durante el reflujó es consistente con que la corriente cerca del fondo no se invierte o se invierte más tarde que en puntos más alejados del fondo. Por lo tanto, agua más caliente proveniente del lado *NW* del umbral fluye sobre agua más fría proveniente de la parte *SE* del umbral.

Las temperaturas mínimas cerca del fondo en el umbral de SL están desfasadas 90° (~ 3 horas) con respecto a las corrientes máximas hacia la cabeza del golfo, mientras que en el umbral de SE el desfase es de aproximadamente 30° (~ 1 hora). En SL, este comportamiento es consistente con advección de aguas frías durante el flujo de la marea y viceversa durante el reflujó. En SE, donde el gradiente horizontal de temperatura es mucho menor, el desfase más pequeño es consistente el con ascenso y descenso de las isotermas durante el flujo y reflujó, respectivamente.

Literatura citada

- Argote, M. L., Amador, A., y Lavín, M. F. (1995). Tidal Dissipation and Stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, **100**, (C8), 16,103–16,118.
- Bloomfield, P. (2000). *Fourier analysis of time series: An introduction*. John Wiley and Sons, Inc. Segunda edición. New York. 257 p.
- Bray, N. A. (1988). Thermohaline Circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 4993–5020.
- Bruno, M., Mananes, R., Alonso, J. J., Izquierdo, A., y Alvarez, O. (1999a). An experimental method to investigate the role of low frequency phenomena in the generation of tidal residues. *Scientia Marina*, **63** (2), 165–175.
- Bruno, M., Mananes, R., Alonso, J. J., Izquierdo, A., Tejedor, L., y Kagan, B. A. (1999b). Vertical structure of the semidiurnal tidal currents at Camarinal Sill, the strait of Gibraltar. *Oceanologica Acta*, **23** (1), 15–24.
- Candela Perez, J. (1982). *Corrientes en el estrecho de Jhonstone B.C., Canadá, durante la primavera y el verano 1973*. Tesis de Maestría, CICESE. Ensenada B.C. México. 208 p.
- Cartwright, D. E. (1999). *Tides a Scientific History*. Cambridge University Press. Primera edición. New York. 292 p.
- Emery, W. y Thomson, R. (2001). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Inc. Segunda edición. Amsterdam. 638 p.
- Filloux, J. H. (1973). Tidal Patterns and Energy Balance in the Gulf of California. *Nature*, **243**, 217–221.
- Filonov, A. E. y Lavín, M. (2003). Internal tides in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, **108** (C5), 20–1/20–17.

- Fu, L. y Holt, B. (1984). Internal waves in the Gulf of California: Observations from a spaceborne radar. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 2053–2060.
- Godin, G. (1988). *Tides*. CICESE. Ensenada BC. México. 290 p.
- Hendershott, M. C. y Speranza, A. (1971). Co-oscilating tides in long, narrow bays the Taylor problem revisited. *Deep-sea Res.*, **18**, 959–980.
- Jiménez Lagunes, A. (2003). *Análisis de las corrientes de marea y series de temperatura en la parte norte del Golfo de California*. Tesis de Maestría, CICESE. Ensenada B.C. México. 84 p.
- Kundu, P. K. y Cohen, I. M. (1990). *Fluid Mechanics*. Elsevier Science. Segunda edición. San Diego, California. 730 p.
- Lavín, M. F. y Marinone, S. G. (2003). An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California. En O. U. Velasco-Fuentes, J. Sheinbaum, y J. Ochoa, editores, *Non-linear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*, capítulo 11, páginas 173–204. Klumer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Lavín, M. F., Beier, E., y Badan, A. (1997). Estructura Hidrográfica y Circulación del Golfo de California: Escalas Estacional e Interanual. En M. M. F. Lavín, editor, *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, capítulo 7, páginas 141–171. Unión Geofísica Mexicana, México.
- Lino Pérez, J. I. (2004). *Corrientes en la región central del Golfo de California a partir de un perfilador acústico de corrientes montado en un barco*. Tesis de Maestría, CICESE. Ensenada B.C. México. 77 p.
- López, M. y García, J. (2003). Moored Observations in the Northern Gulf of California: A Strong Bottom Current . *Geophysical Research Letters*, **108 (C2)**, 30–1/30–18.
- López, M., Candela, J., y Argote, M. (2006). Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, **33**, L11603.

- López, M., Candela, J., y García, J. (2008). Two overflows in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, **113**, 1–12.
- Marinone, S. G. (1997). Tidal residual currents in the Gulf of California: Is the M_2 tidal constituent sufficient to induce them? *Geophysical Research Letters*, **102**, 8611–8623.
- Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (1997). Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. En M. M. F. Lavín, editor, *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, capítulo 6, páginas 113–139. Unión Geofísica Mexicana, México.
- Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (2003). Residual Flow and Mixing in the Large-Islands Region of the Central Gulf of California. En O. U. Velasco-Fuentes, J. Sheinbaum, y J. Ochoa, editores, *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*, capítulo 13, páginas 213–236. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Marinone, S.G. and M.F. Lavín (2005). Tidal Current Ellipses in a Three-dimensional Baroclinic Numerical Model of the Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **64**, 519–530.
- Morales, R. y Gutiérrez, G. (1989). Mareas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, **28**, 33–334.
- Paden, C. A., Abbott, M. R., y Winant, C. D. (1991). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California 1. Sea surface temperature variability. *Journal of Geophysical Research*, **96**, 18337–18359.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE. *Computer and Geosciences*, **28**, 929–937.
- Prandle, D. (1982). The Vertical Structure of Tidal Currents. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, **22**, 29–49.
- Wunsch, C. (1975). Internal Tides in the Ocean. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **13**, 167–182.

Apéndice A

Demodulación compleja clásica

La demodulación compleja clásica (DCC) esta basada en Bloomfield (2000) y consiste en demodular la serie observada $u(t)$ siguiendo el método presentado en la subsección II.2.2. En este caso, obtenemos

$$\mathcal{A}(t) = u(t)e^{-i2\pi f_0 t} * h(t) \quad (25)$$

donde $\mathcal{A}(t)$ es una función compleja que corresponde a la serie demodulada a la frecuencia f_0 con amplitud $|\mathcal{A}(t)|$ y fase $\zeta(t)$. Se aplica el mismo método de la DCC a la predicción de la corriente, con lo que se obtiene otro par de parámetros. Las relaciones que nos interesan se obtienen al comparar las series de los parámetros obtenidos de la corriente observada y su predicción

$$A_{DC-3} = \frac{|\mathcal{A}(t)|}{|\mathcal{A}_p(t)|} \quad \text{y} \quad \Phi_{DC-3} = \zeta(t) - \zeta_p(t) \quad (26)$$

Sin embargo las series de los parámetros de la demodulación compleja, A_{DC-3} y Φ_{DC-3} , presentan valores muy altos que le impiden describir adecuadamente la variación temporal de la CM. Esto ocurre porque la DC de la predicción subestima algunos valores de la amplitud y fase, tales que al compararse con los parámetros de la serie observada se obtienen valores muy por encima a los reales. En la figura 35 se superponen los parámetros obtenidos con la DC de la corriente de marea observada barotrópica en SL-03 usando los tres métodos. La Demodulación compleja de una frecuencia (DCF) y la Demodulación compleja clásica (DCC) demodulan al armónico M_2 , mientras que la Demodulación compleja con admitancia (DCA) demodula a la banda de frecuencia semidiurna.

En la figura 35a se observa como los valores de A_{DC-3} obtenidos con DCC llegan a ser un 250% mayores a los obtenidos con los otros métodos. Con la diferencia de fase ocurre lo mismo, Φ_{DC-3} llega a ser mayor a $|300^\circ|$ cuando con los otros métodos están acotados a menos de 50° (figura 35b). Omitiendo los resultados del método DCC, se presentan en la figura 36 las series obtenidas con DCA y DCF para las dos componentes de la

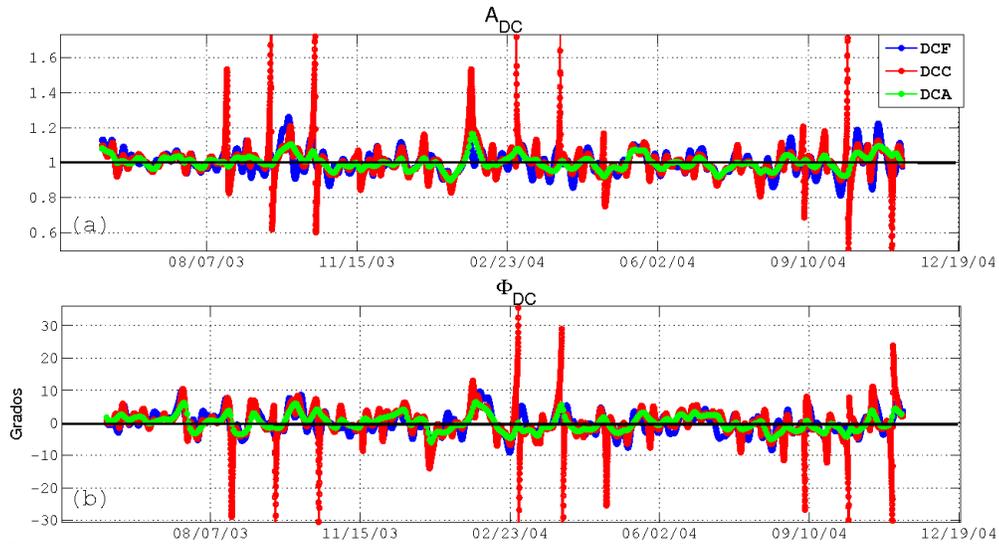


Figura 35. Demodulación compleja de la componente de máxima varianza de la corriente barotrópica en SL-03, usando los tres métodos. DCA demodula la banda semidiurna, mientras DCC y DCF demodulan la frecuencia M_2 . (a) Amplitud y (b) fase, de la demodulación compleja.

corriente barotrópica, orientadas hacia sus ejes principales donde u y v corresponden a las componentes de máxima y mínima varianza, respectivamente, así que u es más energética que v y presentan valores de la amplitud de 49.6 y 3.1 cm/s, respectivamente. En ella se observa, consistencia entre los métodos, siendo los valores de DCA los que presentan valores de menor magnitud.

En la figura 36a, tenemos que la variación temporal de A_{DC} para u , la cual está orientada 138° respecto al Este, se encuentra acotada entre (0.9, 1.2), valores mucho menores respecto a la componente transversal (v), orientada a 228° , la cual se restringe al intervalo de (0, 2) para A_{DC} , ver figura 36b. La diferencia entre la variación temporal de las componentes es aún más evidente en la fase, mientras que los valores de Φ_{DC} para u oscilan entre $\pm 8^\circ$, figura 37a, aquellos de v flúctuan entre $\pm 100^\circ$. La figura 36 muestra que las variaciones de la amplitud de la marea semidiurna es mucho menor para la componente a lo largo del eje de máxima varianza, comparada con la componente a lo largo del eje de mínima varianza.

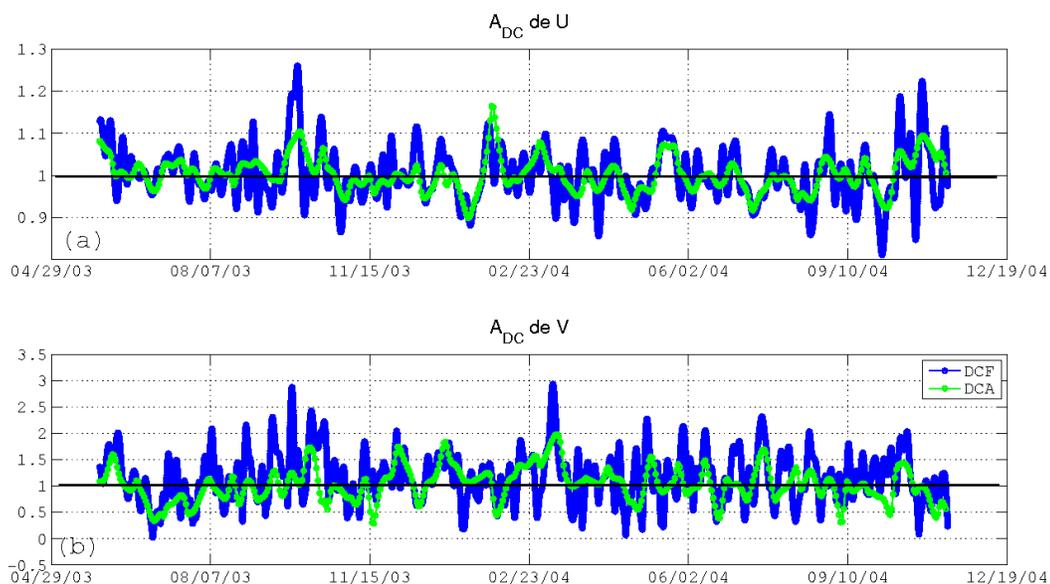


Figura 36. Demodulación compleja de las componentes de la corriente barotrópica en SL-03, orientadas hacia sus ejes principales. Amplitud de la DC para la componente de máxima (a) y mínima (b) varianza.

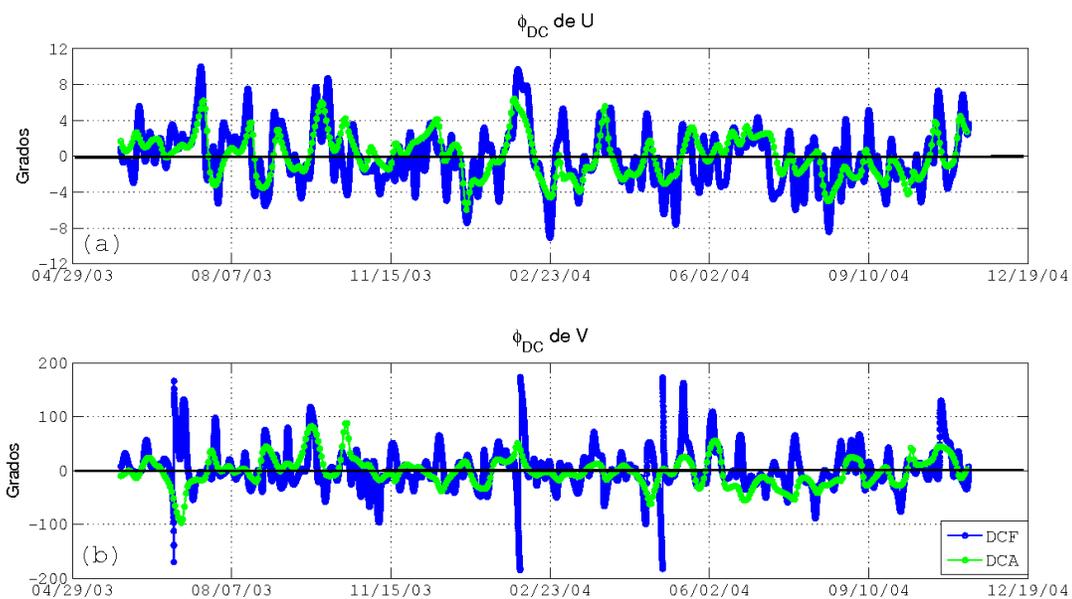


Figura 37. Igual que la figura anterior, pero para la diferencia de fase de la componente de (a) máxima y (b) mínima varianza.

Apéndice B

Períodos de observación

En este apéndice, se muestra la consistencia de los parámetros de la elipse obtenidos con el análisis armónico, calculados a partir de distintos periodos de observación en los umbrales CB (figura 38) y SE (figura 39). Los periodos del umbral SL pueden consultarse en la figura 4 de la subsección III.1.1.

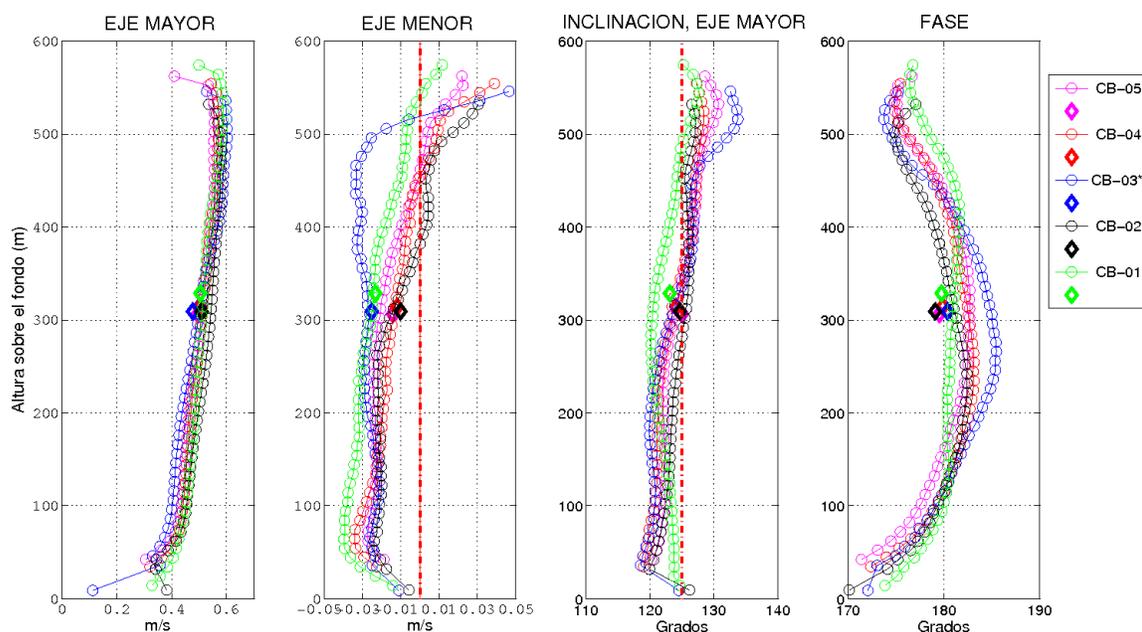


Figura 38. Parámetros de las elipses de las corrientes observadas y barotrópicas para los periodos de observación analizados en el umbral CB. El asterisco indica la presencia de instrumento de fondo.

El umbral DE, es el único que cuenta con un solo periodo de observación. Éstos consisten en períodos comunes entre el corrientímetro de fondo y el ADCP (ver tabla B), el instrumento de fondo en algunos casos no está presente. Cabe mencionar que en el umbral CB, las variaciones verticales más importantes ocurren en los datos registrados por el instrumento de fondo. En el caso de SE, además de los datos de fondo el valor de la fase varía en los primeros 300 m PEF.

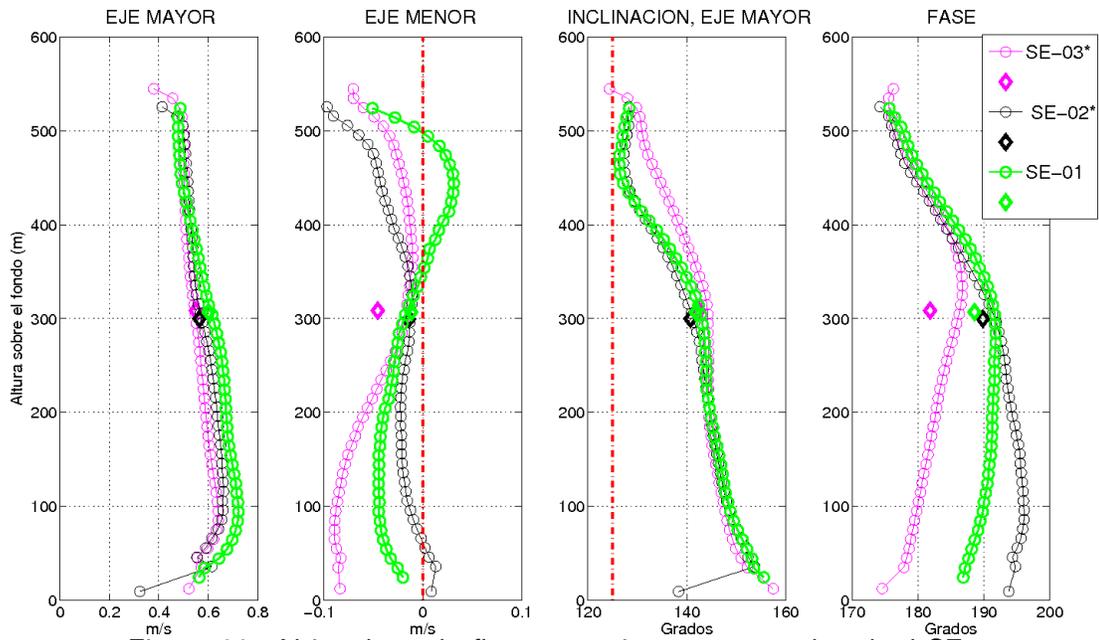


Figura 39. Al igual que la figura anterior pero para el umbral SE.

Apéndice C

Armónicos de la corriente de marea

Tomando como referencia los ocho armónicos más energéticos del umbral SE, a continuación se presenta la estructura vertical del eje mayor (M) para M_2 y la razón señal a ruido (RSR) de dichos armónicos en los umbrales de CB, DE y SL. Conocer la estructura de los mismos armónicos en los cuatro umbrales nos permitió identificar particularidades de cada umbral. A continuación se describen las características relevantes que se encontraron en SL, CB y DE. Los resultados para SE se presentan en la figura 3, subsección III.1.1.

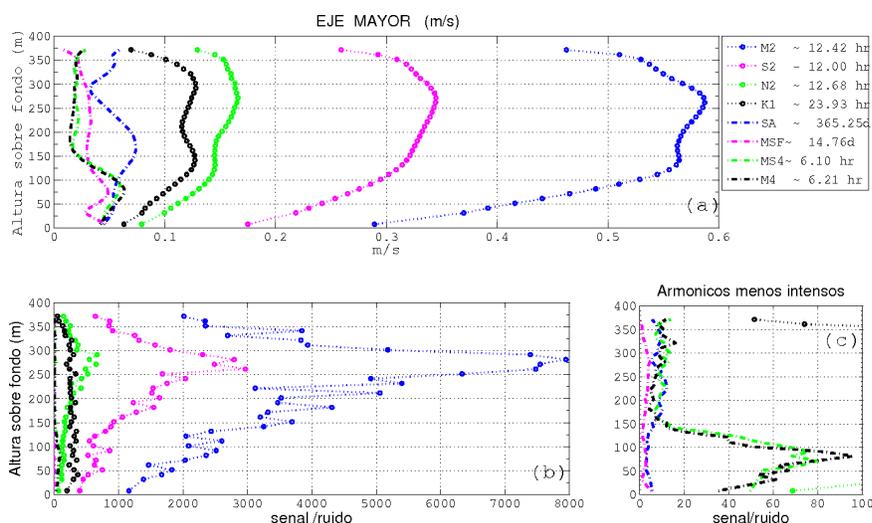


Figura 40. (a) Eje mayor de las elipses de marea para los armónicos más intensos, de cada banda de frecuencia, correspondientes al umbral SL-03. (b) Razones de señal a ruido correspondientes a los ocho armónicos analizados. (c) Acercamiento de (b) para los armónicos con la razón más pequeña.)

El segundo umbral con valores altos de M es SL y son ligeramente menores a 0.6 m/s a media columna de agua (figura 40a), altura que coincide con los valores más altos de RSR. Cabe mencionar que el valor de RSR de 8000 en SL es el más alto registrado en los cuatro umbrales, casi el doble del valor más próximo, el cual está registrado en DE. En SL las constituyentes que sobresalen son las semidiurnas y diurnas; en los primeros 100 m el resto de los armónicos parecen tener la misma importancia. Sin embargo la RSR de la

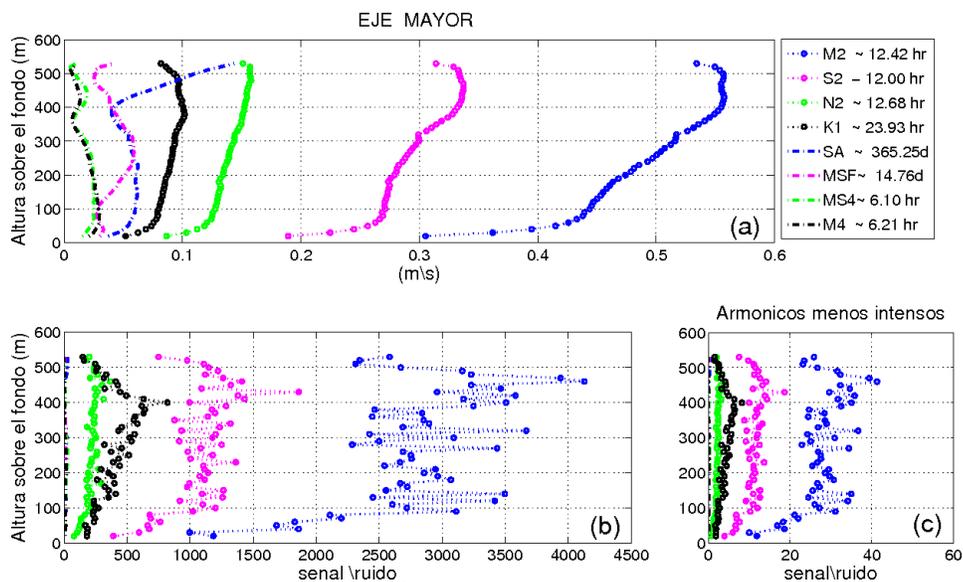


Figura 41. Igual que la figura 40, pero para el umbral CB-05.

figura 40c indica que los armónicos cuartidiurnos se encuentran mejor determinados cerca del fondo.

Posteriormente le sigue CB, ver figura 41a, este umbral alcanza sus mayores velocidades cerca de la superficie, entre 400 y 500 m PEF, a esta profundidad la constituyente anual presenta valores mayores al armónico diurno y próximos al semidiurno (N_2), ambos armónicos tienen una estructura vertical de RSR bastante uniforme excepto cerca del fondo y la superficie.

El umbral más cercano a CB es DE (puede verse su ubicación geográfica en la figura 1, sección I.1). En la figura 42a puede verse que la banda quincenal y anual alcanzan mayores valores de M cerca del fondo que la frecuencia diurna (en el caso de MSF) y que la semidiurna N_2 (en el caso de SA). Los máximos valores de RSR son evidentes en la banda semidiurna, entre 200- 250 m PEF.

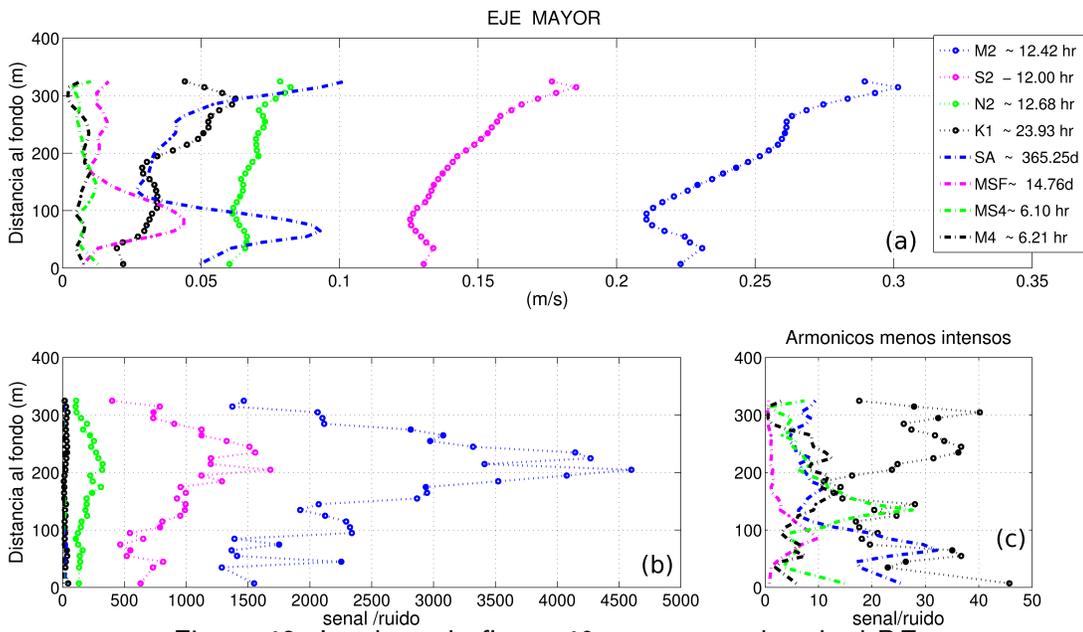


Figura 42. Igual que la figura 40, pero para el umbral DE.