

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



Maestría en Ciencias en Oceanografía Física

Corrientes de marea y ondas internas en el Cañón de Punta Banda, Baja California, México

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Andrea Mitre Apáez

Ensenada, Baja California, México
2022

Tesis defendida por
Andrea Mitre Apáez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Director de tesis

Dr. Julio Candela Pérez

Dra. Paula Pérez Brunius

Dr. David Rivas Camargo



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Andrea Mitre Apáez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Corrientes de marea y ondas internas en el Cañón de Punta Banda, Baja California, México.

Resumen aprobado por:

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Director de tesis

Se analizaron datos de corriente y temperatura recopilados por tres anclajes en un periodo aproximado de un año (2011-2012) con el objetivo de estudiar las corrientes de marea y oscilaciones de temperatura en el cañón de Punta Banda en la Bahía de Todos Santos. En espectros de potencia se identificó a las bandas diurna y semidiurna como las más energéticas en el rango de las frecuencias de marea en los tres anclajes. Análisis armónicos de los datos de corrientes, temperatura y de la profundidad de la isoterma de 9°C, mostró que la constituyente M_2 es la más energética, seguida por la diurna K_1 y ambas presentaron una estructura vertical baroclínica. Otra manifestación de la marea baroclínica fue la amplitud de 6.25 m en las variaciones de la profundidad de la isoterma de 9°C para la M_2 y 3.85 m para la K_1 . Asimismo, el análisis armónico mostró que hay una intensificación de las corrientes de marea en el cañón entre Punta Banda y la isla. En el único anclaje con una duración mayor a un año se encontró que los satélites anuales de la M_2 son significativos indicando una importante variación estacional de esta constituyente. Las amplitudes máximas de las corrientes para la M_2 fueron alrededor de 7 cm/s. Sin embargo, el análisis armónico de las series estacionales mostró que el otoño es la estación más energética con amplitudes máximas que llegaron a 15 cm/s, mientras que la primavera fue la estación menos energética con amplitudes máximas de 6 cm/s para la constituyente M_2 . Con respecto a la variación de la profundidad de la isoterma de 9°C, la mayor amplitud del desplazamiento se presentó en primavera, con una amplitud de 11 m, y la menor se presentó en invierno, donde la amplitud disminuye a 3 m. Las fases de las corrientes baroclínicas y de la temperatura de la M_2 se propagan hacia abajo, consistentes con una velocidad de grupo de las ondas internas de gravedad con dirección hacia la superficie. La estructura vertical de las fases de las corrientes baroclínicas es aproximadamente lineal y los valores de la propagación vertical que se estiman de las fases son consistentes con las del segundo modo baroclínico para una estratificación uniforme. El ajuste lineal a las fases de corrientes baroclínicas y temperatura arroja una diferencia de fase cercana a un cuarto de periodo, consistente con el desfase de una onda interna plana con estratificación uniforme. La dirección de propagación horizontal calculada a partir de un método que involucra diferencias de fases entre los anclajes infiere una zona de generación al suroeste del cañón conocido como valle de la Soledad que cuenta con un bajo que podría ser el que genere las ondas captadas por los anclajes. Sin embargo, las velocidades de propagación horizontal que se infieren con este método son muy bajas y, por tanto, probablemente erróneas.

Palabras clave: Corrientes de marea, cañón submarino de Punta Banda, marea baroclínica, variación estacional de las corrientes de marea semidiurna, propagación de ondas internas de gravedad.

Abstract of the thesis presented by Andrea Mitre Apáez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Tidal currents and internal waves in Punta Banda Canyon, Baja California, Mexico.

Abstract approved by:

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Thesis Director

Current and temperature data collected by three moorings for approximately one year (2011-2012) were analyzed to study tidal currents and temperature oscillations in the Punta Banda canyon in Todos Santos Bay. In power spectra, the diurnal and semi-diurnal bands were identified as the most energetic in the range of tidal frequencies in the three moorings. Harmonic analysis of the data on currents, temperature, and the depth of the 9°C isotherm, showed that the constituent M_2 is the most energetic, followed by the diurnal K_1 and both presented a vertical baroclinic structure. Another manifestation of the baroclinic tide was the amplitude of 6.25 m in the variations of the depth of the 9°C isotherm for M_2 and 3.85 m for K_1 . Likewise, the harmonic analysis showed that there is an intensification of the tidal currents in the canyon between Punta Banda and the island. In the only mooring with a duration greater than one year, it was found that the annual satellites of M_2 are significant, indicating an important seasonal variation of the constituent. The maximum current amplitudes for the M_2 constituent were around 7 cm/s. However, the harmonic analysis of the seasonal series showed that autumn is the most energetic season with maximum amplitudes reaching 15 cm/s, while spring was the least energetic season with maximum amplitudes of 6 cm/s for the constituent M_2 . Regarding the variation of the depth of the 9°C isotherm, the greatest displacement amplitude occurred in spring, with an amplitude of 11 m, and the lowest occurred in winter, where the amplitude decreased to 3 m. The M_2 temperature and baroclinic current phases propagate downwards, consistent with a surface-directed group velocity for internal gravity waves. The vertical structure of the phases of the baroclinic currents is approximately linear and the values of the vertical propagation that are estimated from the phases are consistent with those of the second baroclinic mode for a uniform stratification. The linear fit to the phases of baroclinic currents and temperature yields a phase difference close to a quarter of a period, consistent with the phase shift of a plane internal wave with uniform stratification. The horizontal propagation direction calculated from a method that involves phase differences between the mooring infers a generation zone to the southwest of the canyon known as Valle de la Soledad that has a shallow bank that could be the one that generates the waves captured by the moorings. However, the horizontal propagation velocities inferred with this method are very low and therefore probably wrong.

Keywords: Tidal currents, Punta Banda submarine canyon, baroclinic tides, seasonal variation of semidiurnal tidal current, internal gravity waves propagation.

Dedicatoria

A mis abuelas Andrea y Alicia que partieron durante esta pandemia, las llevaré en mi corazón y mente por su amor y sabiduría.

Agradecimientos

Le agradezco a mis padres Salvador y Martha por su apoyo incondicional, así como al resto de mi familia, mi hermano Salvador, mi tía Selva y mis abuelos Antonio y Aída.

A Óscar por su amor y compañía.

A mis amigos del alma Mayra, Wicho, Anni, Miranda y Sam que me acompañan desde la universidad.

A los profesores del posgrado que con su pasión por la investigación siembran cada día semillas de curiosidad en sus estudiantes.

Al Dr. Manuel López por su paciencia y sabiduría como guía en este trabajo, así como al resto del comité: al Dr. Julio Candela por proporcionarme el método para estimar la rapidez de fase de una onda y en general incluyendo al Dr. David Rivas y a la Dra. Paula Pérez-Brunius por sus comentarios y dudas que fortalecieron esta tesis.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por la oportunidad y apoyo para estudiar una maestría en Oceanografía Física.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 994660.

Además del financiamiento de los siguientes proyectos de ciencia básica del CONACyT de los cuales se obtuvieron los datos trabajados: U50122-F, 98471, y 106153.

Y por último a los fluidos, en especial el océano por ser tan inmenso e interesante.

Tabla de Contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas.....	xi
 Capítulo 1. Introducción	 1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo general	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
 Capítulo 2. Datos y Metodología	 4
2.1. Datos.....	4
2.2. Estadísticas básicas.....	7
2.3. Análisis espectral	7
2.4. Análisis armónico.....	7
2.5. Teoría de las ondas internas de gravedad.....	8
 Capítulo 3. Resultados.....	 15
3.1. Estadísticas básicas.....	15
3.1.1. Promedio y desviación estándar de las corrientes	15
3.1.2. Ángulo del eje principal o de máxima varianza	16
3.1.3. Promedio y desviación estándar de la temperatura	17
3.2. Espectros	18
3.3. . Análisis armónico (AA).....	27
3.3.1. Constituyente K ₁	30
3.3.2. Constituyente M ₂	34

3.3.3. Variación estacional de la M2.....	38
Capítulo 4. Discusión	42
4.1. Características generales de las corrientes.....	42
4.2. Variación estacional.....	42
4.3. Propagación vertical	44
4.4. Propagación horizontal.....	46
Capítulo 5. Conclusiones	51
Literatura citada	53
Apéndice	55

Lista de figuras

Figura		Página
1	Batimetría de la bahía de Todos Santos donde se puede apreciar la presencia del cañón de Punta Banda ubicado entre las islas y la Punta Banda hacia el sureste de las islas.	2
2	Ubicación de los tres anclajes equipados con ADCP's y Microcats analizados en este estudio. D12, D23 y D31 son las distancias entre los anclajes, especificadas en la Tabla 1.	4
3	Diagramas de distribución de los instrumentos en cada uno de los tres anclajes. (a) Primer anclaje (A01) ubicado en el centro del cañón entre las islas y la Punta Banda, equipado con ocho microcats y un ADCP (boya naranja), (b) segundo anclaje (A02) contó con un ADCP, y (c) tercer anclaje (A03) equipado con un microcat y un ADCP.	5
4	Ubicación de lances de CTD cercanos a los anclajes A01, A02 y A03, a partir de 13 campañas realizadas en la Bahía de Todos Santos. Los puntos rodeados por blanco representan la ubicación de los anclajes, mientras que los rodeados por negro son los 13 lances de CTD correspondientes a cada anclaje.	6
5	Estadísticas básicas calculadas a las componentes u (este-oeste) y v (norte-sur) de la corriente. De izquierda a derecha se muestra (a) el promedio y (b) desviación estándar de u , mientras que (c) y (d) corresponden a al promedio y desviación estándar de v del anclaje A01	16
6	Ángulo de inclinación del eje principal (máxima varianza). Donde (a) corresponde a A01, (b) a A02 y (c) a A03. En (a) y (c) la línea vertical roja corresponde a la dirección del eje del cañón.	17
7	Estadísticas básicas calculadas a los datos de temperatura obtenidos de 8 microcats instalados en A01 y los ADCP's en los anclajes A02 y A03. (a) Promedio temporal y (b) su desviación estándar.	18
8	Espectros de densidad de energía calculados a partir de las series de temperatura de los microcats. En (a) se muestra la distribución del logaritmo de la densidad de energía espectral (S), en (b) el espectro de la serie del microcat más somero; y (c) el espectro de la serie del microcat más profundo. La línea roja en (b) y (c) representa el intervalo de confianza y DF es la distancia al fondo en la que se ubicó el microcat correspondiente al espectro. Las líneas verticales corresponden a diferentes frecuencias señaladas en la leyenda.	19
9	Espectros calculados a partir de las series de temperatura registradas por los ADCP's de los anclajes A02 (a) y A03 (b). La línea roja en (b) y (c) representa el intervalo de confianza y DF es la distancia al fondo en la que se ubicó el microcat correspondiente al espectro. Líneas verticales igual que en la Figura 8.	20
10	Espectro rotacional mostrando el logaritmo de la densidad de energía espectral (S) en el anclaje A01, donde (a) es la energía existente en la corriente total y (b) en la componente baroclínica. Las líneas verticales marcan las frecuencias de 1 y 2 cpd, tanto para frecuencias positivas, como negativas.	21

11	Espectros rotacionales calculados a partir de las celdas más profunda (a); y más somera (b) del ADCP del anclaje A01. DF es la distancia al fondo. Las frecuencias positivas y negativas se muestran con líneas roja y azul, respectivamente. Líneas verticales igual que en la Figura 8.	22
12	Acercamiento a la banda diurna en los espectros rotacionales del anclaje A01 (Figura 10). (a) y (b) corresponden a la corriente total, y para las frecuencias negativas y positivas respectivamente. Mientras que (c) y (d) corresponden a la componente baroclínica. Las unidades son el logaritmo base 10 de la densidad de energía espectral (S).	23
13	Igual que la Figura 10 pero para el anclaje A02.	23
14	Igual que la Figura 11 pero para el anclaje A02.	24
15	Igual que la Figura 12 para el anclaje A02 y para la corriente total exclusivamente.	25
16	Igual que la Figura 10 pero para el anclaje A03.	25
17	Igual que la Figura 11 pero para el anclaje A03.	26
18	Igual que la Figura 15 pero para el anclaje A03.	27
19	Porcentaje de varianza explicada y constituyentes más energéticas del AA realizado a las series de temperatura y de la profundidad de la isoterma de 9 °C extraída de los microcats. (a) Porcentaje de varianza explicada. (b) Cinco constituyentes más energéticas de las temperaturas registradas por los ADCP's de cada anclaje y microcat más somero en el anclaje A01 (recuadro del lado derecho); y (c) igual que (b) pero para la profundidad de la isoterma de 9°C. Las constituyentes α_2 y β_2 aparecen en los paneles como H1 y H2 respectivamente.	28
20	Varianzas explicadas de los análisis armónicos realizados a las series de corrientes totales (línea azul), componente barotrópica (cuadro rojo) y componente baroclínica (línea morada) de los tres anclajes: (a) A01, (b) A02 y (c) A03. Además, se grafican las cinco constituyentes más energéticas de cada corriente por anclaje: (d) A01, (e) A02 y (f) A03. La energía de la corriente total y la componente baroclínica están promediadas en la vertical. Las constituyentes α_2 y β_2 aparecen en los paneles como H1 y H2, respectivamente.	29
21	Resultados del AA de la temperatura, (a) amplitud y (b) fase para la constituyente K1. En (a) se observan las amplitudes obtenidas de los microcats y los ADCP's correspondientes a cada anclaje. Mientras que en (b), se agregó la fase de la profundidad de la isoterma de 9°C.	31
22	Parámetros de las elipses de marea obtenidos del AA de la corriente total y sus componentes barotrópica y baroclínica en los tres anclajes para la constituyente K1. (a) Eje mayor, (b) eje menor, ambos incluyen los errores correspondientes, (c) inclinación y (d) fase. para el anclaje A01. Paneles (e), (f), (g) y (h), igual que (a), (b), (c) y (d) para el anclaje A02. Paneles (i), (j), (k) y (l), igual (a), (b), (c) y (d) para el anclaje A03. BT y BC en la leyenda se refieren a barotrópicas y baroclínicas, respectivamente. El triángulo invertido es la fase de la isoterma de 9°C.	32
23	Mapa de elipses de marea de la componente barotrópica de cada anclaje para la constituyente K1. El color corresponde al logaritmo de la magnitud del gradiente de la batimetría. El color del eje en las elipses (negro) indica que las tres elipses rotan positivamente.	33

24	Al igual que en la Figura 21 pero para la constituyente M2. Para esta figura se le restó 360° a la fase de la profundidad de la isoterma de 9°C.	35
25	Igual que la Figura 22 pero para la constituyente M2.	36
26	Igual que la Figura 23 pero para la constituyente M2	37
27	Parámetros de la elipse de marea de las constituyentes α_2 , β_2 y M2 en el anclaje A01. (a) Eje mayor, (b) eje menor, (c) inclinación y (d) fase.....	38
28	Amplitud (a) y fase (b) del AA a las series estacionales de temperatura de los ocho microcats instalados en el anclaje A01 para la constituyente M2.	39
29	Variación estacional del eje mayor (a) y fase (b) de la constituyente M2 de la corriente total. (c) y (d) igual que en (a) y (b) pero para las corrientes baroclínicas.....	41
30	Variación estacional del promedio vertical de N^2 estimada en el anclaje A01. Se muestran los promedios verticales y estacionales de N^2 calculada a partir de los datos de CTD en toda la columna de agua; utilizando nada más los datos cerca de la superficie (menores a 65 m de profundidad); y utilizando los datos de los microcats que no cubren los primeros 65 m de la columna de agua.	44
31	Ajustes lineales superpuestos a los perfiles de fase de las corrientes baroclínicas y de la temperatura medida por los microcats en el anclaje del cañón (A01). Las fases de cada anclaje se obtuvieron a partir de AA al periodo común entre los tres anclajes (4/11/2011 al 29/07/2012).....	45
32	Cresta y dirección de propagación de las posibles ondas en un escenario de propagación para la constituyente M2. (a) Escenario a partir de los desfases entre los promedios verticales de fase de las corrientes baroclínicas. (b) Escenario con los desfases entre los anclajes a partir de la temperatura medida por los ADCP's. En color se muestra el logaritmo base 10 de la magnitud del gradiente de batimetría (γ).	47
33	Igual que la Figura 32, pero para la constituyente K1.....	49
34	Diagrama representativo de crestas de ondas propagándose en la dirección θ con respecto a la horizontal y pasando sobre tres puntos (1, 2, 3).	55

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Distancias entre los tres anclajes señaladas en la Figura 2.....	4
2	Periodos de muestreo, profundidad del fondo y número de celdas de medición de las corrientes en los tres anclajes.....	5
3	Fechas de muestreo de las 13 campañas en bahía Todos Santos y las estaciones del año designadas a cada campaña.....	6
4	Parámetros de las elipses de marea de las componentes barotrópicas de las corrientes de los tres anclajes para la constituyente K1.....	34
5	Parámetros de las elipses de marea de las componentes barotrópicas de las corrientes de los tres anclajes para la constituyente M2.....	37
6	Promedios climatológicos estacionales de N^2 . Calculados a partir de las campañas de CTD estacionales entre 2008 y 2012 (ver Tabla 3). Valores multiplicados por 10^5	43
7	Rapidez de fase vertical y longitud de onda vertical estimada a partir de las regresiones lineales.....	46
8	Diferencias de fases correspondientes a dos escenarios de propagación horizontal para la constituyente M2.	47
9	Rapidez de fase, ángulo de inclinación del frente de onda con respecto al este y longitud de onda estimados empíricamente para la constituyente M2.	48
10	Diferencias de fases correspondientes a cada escenario de propagación horizontal para la constituyente K1.....	49
11	Rapidez de fase, ángulo de inclinación del frente de onda con respecto al este y longitud de onda estimados empíricamente para la constituyente	50

Capítulo 1. Introducción

Los cañones submarinos son sitios importantes de intercambio de propiedades químicas, biológicas y físicas entre la plataforma continental y el mar profundo (Ramos-Musalem y Allen, 2019). Según Hotchkiss y Wunsch (1982), la dinámica oceánica en el cañón influye en su estructura geológica mediante el transporte de sedimento. Mientras que, a su vez la dinámica oceánica también se ve influenciada por los quiebres del cañón en la plataforma continental. Las mareas son un ejemplo de que al impactar contra el cañón generan ondas internas como fenómeno proveniente de esta interacción, y pueden reflejarse en las paredes del cañón dadas las condiciones adecuadas (Wunsch, 1975). De hecho, Petruncio *et al.* (1998) reafirma que los cañones submarinos son “trampas” de ondas internas, descripción realizada primero por Gordon y Marshall (1976), quienes concluyeron que las ondas una vez atrapadas no pueden escapar y se disipan eventualmente sobre el eje del cañón.

El estudio de las ondas internas en cañones es relativamente reciente, y el interés en estas zonas se derivó del trabajo realizado por Garrett y Munk (1975), en el cual desarrollaron un espectro general para ondas internas que al ser dividido por la frecuencia de Brunt-Väisälä es prácticamente universal para mar abierto (Hotchkiss y Wunsch, 1982). Sin embargo, al buscar lugares que fueran excepción a esta generalización, Wunsch y Webb (1979) encontraron que en presencia de estructuras topográficas como cañones y montañas submarinas las ondas internas eran más energéticas que las contempladas en el espectro de Garrett-Munk. Con respecto a las mareas, Hotchkiss y Wunsch (1982) hablan sobre dos factores en los que estas influyen en el campo de velocidades en los cañones y generan ondas internas a las frecuencias de marea (definidas de ahora en adelante como mareas internas): una es el impacto directo que tienen la onda barotrópica de marea al encontrarse con el cambio abrupto de pendiente que causa fuertes velocidades conforme desciende la profundidad y en segundo, la presencia de estratificación en la columna de agua. Según Petruncio *et al.* (1998) las ondas en cañones presentan mayor energía que las generadas en zonas adyacentes.

Dentro del espectro de densidad de energía de las ondas internas, resaltan las mareas internas, las cuales se dividen en tres especies: mareas de largo periodo, mareas diurnas y mareas semidiurnas (Gerkema, 2019; Wunsch, 1967). A pesar de que cada especie engloba distintas constituyentes, no todas son relevantes en cuestión de amplitud, por lo que Gerkema (2019) menciona las ocho más importantes en cuestión de energía en las mareas: M_2 , K_1 , S_2 , O_1 , P_1 , N_2 , M_f y K_2 . De las mareas de largo periodo solo aparece la M_f llamada marea quincenal, cuenta con la mayor amplitud de esta especie en el orden de 1

cm en el nivel del mar (Wunsch, 1967). Las constituyentes K_1 , O_1 y P_1 pertenecen a las mareas diurnas. P_1 relacionada a la declinación solar, O_1 referente a la declinación lunar y la frecuencia K_1 que corresponde a la declinación conjunta de la Luna y el Sol con un periodo de un día sideral. La M_2 es la semidiurna principal lunar, S_2 la semidiurna principal solar, N_2 es la mayor de las elípticas (debidas a la órbita elíptica de la Luna) y K_2 corresponde a medio día sideral (Gerkema, 2019).

La frecuencia semidiurna M_2 es la dominante en los estudios de Wunsch y Webb (1979) y Hotchkiss y Wunsch (1982). Otro estudio que corroboró el dominio de esta frecuencia fue Kunze *et al.* (2002), quienes concluyeron además, que las mareas internas dominan a los movimientos inerciales en presencia de cañones submarinos, situación que es muy diferente a la del océano abierto donde las ondas internas más energéticas son las cercanas a la frecuencia inercial (Kunze, 1985). Cabe destacar que en latitudes cercanas a 30° es difícil diferenciar la frecuencia inercial de otros procesos físicos, ya que el periodo inercial a esa latitud es cercano a un día. Como ejemplo, las brisas son un fenómeno importante en las costas con un periodo diurno que influye en las corrientes superficiales.

El cañón de Punta Banda está ubicado en la entrada sur de la bahía de Todos Santos (Figura 1) en el municipio de Ensenada, Baja California, México; entre las islas de Todos Santos y la Punta Banda. Este cañón ha sido objeto de pocas investigaciones realizadas previamente y, en especial, no se tienen antecedentes de que se hayan estudiado las corrientes de marea, y su posible generación dentro del cañón. El conocer si estos procesos se desarrollan en el cañón nos puede dar una idea de si el cañón está actuando como fuente o amplificador de mareas internas.

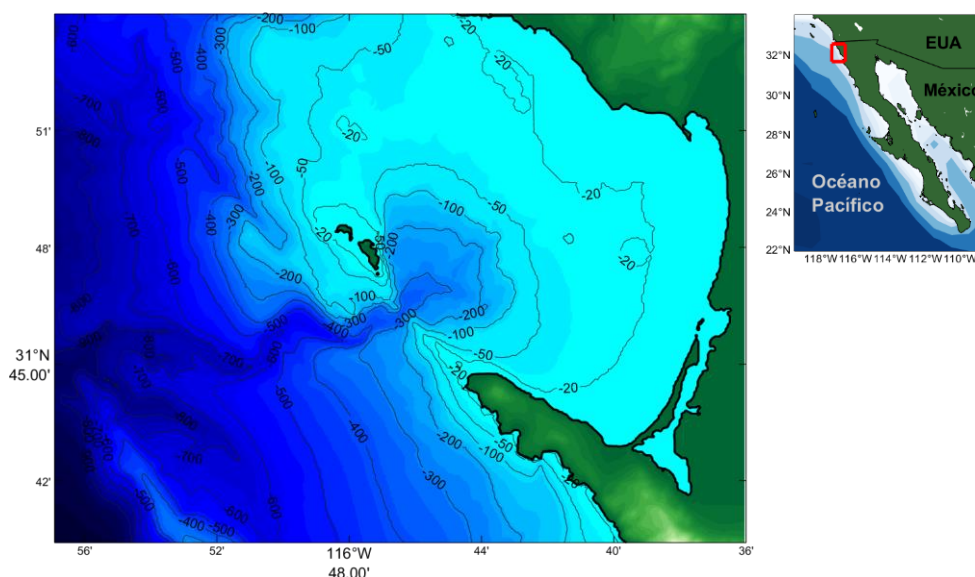


Figura 1. Batimetría de la bahía de Todos Santos donde se puede apreciar la presencia del cañón de Punta Banda ubicado entre las islas y la Punta Banda hacia el sureste de las islas.

La bahía de Todos Santos ha sido estudiada por diversos investigadores con diferentes propósitos. Uno de estos estudios, es el análisis realizado por Mateos y Marinone (2017) quienes describen la circulación de la bahía con base a un modelo numérico, y concluyen que los principales forzamientos en la circulación son el viento y la marea, aunque su estudio se centra en la circulación inducida por el viento. Concluyen que el transporte de agua (debido solo al viento) produce una circulación en la cual agua entra por el norte (entre la Isla y Punta San Miguel) y sale de la bahía por la parte sur, justo por donde se localiza el cañón.

Existe un antecedente enfocado en zonas de generación de ondas internas que se propagan dentro de la bahía de Todos Santos realizado por Filonov *et al.* (2014). Estos autores estimaron dos zonas de generación que radian ondas a la frecuencia de la M_2 hacia la bahía, al norte de las islas y en el quiebre de la plataforma frente a San Miguel (punta que cierra la bahía al norte). Además, son los primeros en reportar la presencia de energía en la banda diurna, la cual por la latitud no se puede describir con teoría de ondas internas de gravedad y asocian su presencia al impacto de las brisas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Estudiar las corrientes de marea en el cañón de Punta Banda y hacer una descripción y caracterización de dichas corrientes.

1.1.2. Objetivos específicos

- Establecer la importancia relativa de las corrientes de marea en el cañón.
- Estimar la contribución de las corrientes de marea barotrópicas y baroclínicas a las corrientes de marea observadas.
- Analizar la variación estacional de la marea baroclínica.
- Establecer algunas características de propagación de las ondas baroclínicas de marea.

Capítulo 2. Datos y Metodología

2.1. Datos

Los datos analizados fueron recopilados por tres anclajes equipados con perfiladores acústicos de corrientes (ADCP's por sus siglas en inglés) instalados muy cerca del fondo (Figura 2). Los ADCP's registraron datos de corrientes en casi toda la columna de agua y datos de temperatura a la profundidad del ADCP. Además, el anclaje A01 estuvo equipado con ocho microcats que registraron temperatura y conductividad a diferentes profundidades de la columna de agua (Figura 3).

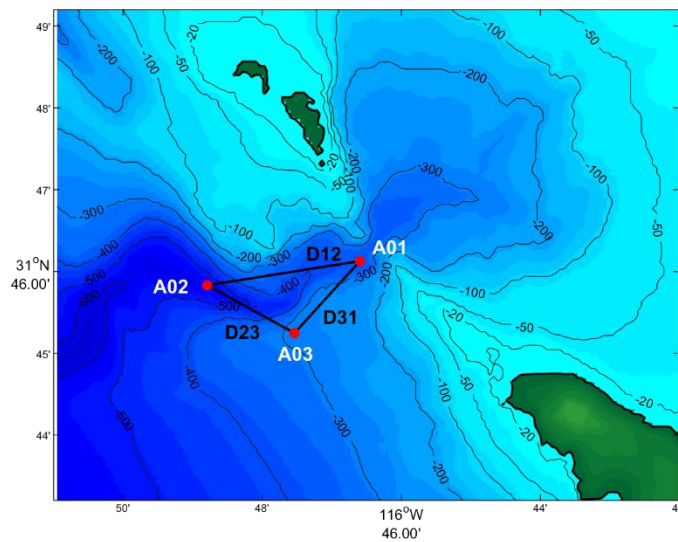


Figura 2. Ubicación de los tres anclajes equipados con ADCP's y Microcats analizados en este estudio. D12, D23 y D31 son las distancias entre los anclajes, especificadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Distancias entre los tres anclajes señaladas en la Figura 2.

Sección	Distancia (km)
D12	3.51
D23	2.25
D31	2.20

Los anclajes fueron ubicados en distintas partes del cañón como se observa en la Figura 2. Intencionalmente se instalaron para formar un triángulo cuyas distancias se especifican en la Tabla 1. Cada anclaje tuvo distintos periodos de muestreo, número de celdas y profundidad del fondo, estos detalles se

especifican en la Tabla 2. El anclaje del cañón es denominado como A01, el anclaje que contó con la mayor profundidad como A02 y el que contó con la menor profundidad como A03. La distribución particular de los instrumentos en cada anclaje se muestra en los diagramas de la Figura 3.

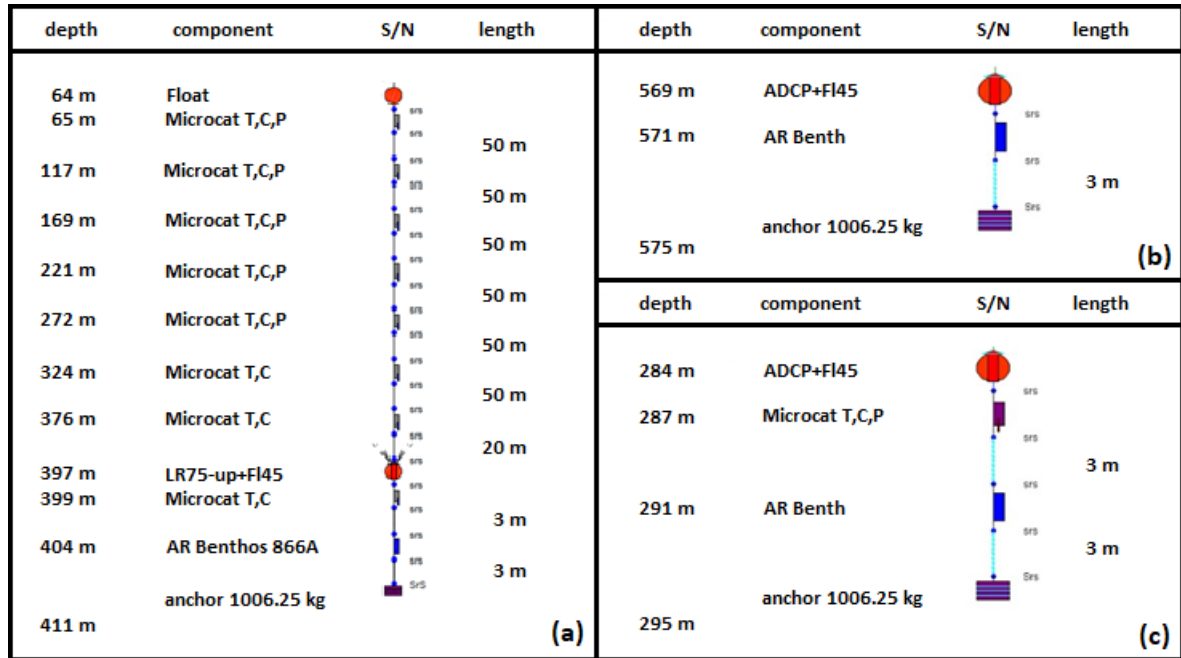


Figura 3. Diagramas de distribución de los instrumentos en cada uno de los tres anclajes. (a) Primer anclaje (A01) ubicado en el centro del cañón entre las islas y la Punta Banda, equipado con ocho microcats y un ADCP (boya naranja), (b) segundo anclaje (A02) contó con un ADCP, y (c) tercer anclaje (A03) equipado con un microcat y un ADCP.

Tabla 2. Periodos de muestreo, profundidad del fondo y número de celdas de medición de las corrientes en los tres anclajes.

Series de tiempo				Profundidad	
ADCP	Inicio	Final	# Días	Fondo (m)	# Celdas
Anclaje A01	15/06/11	30/10/12	503.45	411	35
Anclaje A02	28/09/11	29/07/12	304.79	575	50
Anclaje A03	04/11/11	30/10/12	360.87	295	25
MICROCATS					# Instrumentos
Anclaje A01	14/06/11	30/10/12	503.54	411	8

Para estimar la estratificación se utilizó, a parte de la información proporcionada por los microcats, los datos de trece campañas de lances de CTD (Conductividad, temperatura y profundidad, por sus siglas

en inglés). De cada campaña se extrajeron los lances más cercanos a cada uno de los anclajes, y sus posiciones se muestran en la Figura 4. Las trece campañas se realizaron entre los años 2008 y 2012, como se especifica en la Tabla 3. Con estos datos se estimó el valor de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2) promedio y estacional para la zona correspondiente a cada anclaje a partir de los datos disponibles.

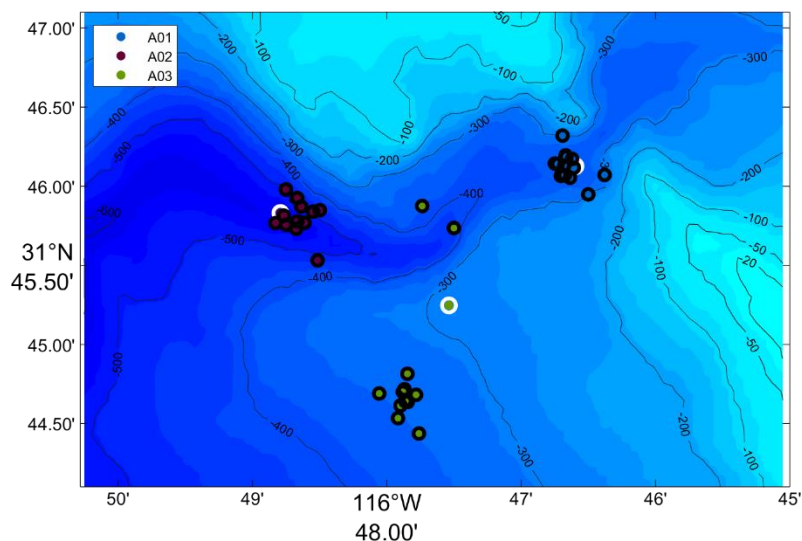


Figura 4. Ubicación de lances de CTD cercanos a los anclajes A01, A02 y A03, a partir de 13 campañas realizadas en la Bahía de Todos Santos. Los puntos rodeados por blanco representan la ubicación de los anclajes, mientras que los rodeados por negro son los 13 lances de CTD correspondientes a cada anclaje.

Tabla 3. Fechas de muestreo de las 13 campañas en bahía Todos Santos y las estaciones del año designadas a cada campaña.

Día	Mes	Año	Estación designada
15	Enero	2008	Invierno
20	Noviembre	2008	Otoño
04	Abril	2008	Primavera
14	Agosto	2008	Verano
27	Octubre	2010	Otoño
24	Abril	2010	Primavera
25	Agosto	2010	Verano
23	Febrero	2011	Invierno
12	Mayo	2011	Primavera
03	Agosto	2011	Verano
08	Noviembre	2011	Otoño
02	Marzo	2012	Invierno
14	Noviembre	2012	Otoño

2.2. Estadísticas básicas

Para tener un panorama general de los datos de corrientes y temperatura se calcularon estadísticas básicas tales como: promedio temporal, desviación estándar y ángulo del eje de máxima varianza para las corrientes. Además, se aplicó un filtro paso bajo con un periodo de corte de 36 horas para obtener series de baja frecuencia. Para conseguir series de altas frecuencia, se restó la serie de baja frecuencia de las series totales. Se calcularon algunas estadísticas básicas de las series de baja frecuencia y alta frecuencia.

2.3. Análisis espectral

Garrett y Munk (1979) describen al análisis espectral como una herramienta básica para analizar series de tiempo e identificar en qué frecuencias se concentra la mayor densidad de energía. Por lo que, a los datos de temperatura se les calculó un espectro escalar, mientras que a los datos de corrientes se les calculó un espectro rotacional.

Para los análisis espectral y armónico se estimaron las componentes barotrópica y baroclínica de la corriente. La componente barotrópica se estimó simplemente mediante el promedio vertical, y las corrientes baroclínicas restando dicho promedio a las corrientes totales.

2.4. Análisis armónico

A partir de análisis armónicos de las corrientes, temperatura y profundidad de una isoterma se obtuvieron las frecuencias de marea más energéticas y la variación vertical de sus amplitudes y fases. Para el caso de las corrientes, el análisis se realizó al vector horizontal de corriente expresado en forma compleja ($w = u + iv$) para obtener los 4 parámetros de las elipses de marea que permiten caracterizar a las corrientes de marea de manera independiente de cualquier eje coordenado y se obtienen para todas las frecuencias de marea que se puedan resolver con base a la longitud de la serie analizada.

Los cuatro parámetros de las elipses de marea son el eje mayor, el eje menor, la inclinación del eje mayor con respecto al este y la fase. El eje mayor da la máxima corriente, mientras que el eje menor da la mínima corriente dentro del periodo asociado a una frecuencia determinada. Para una frecuencia dada, el vector de corriente describe una elipse durante el periodo asociado a esa frecuencia, por lo tanto, pasa dos veces por el semieje mayor (corriente máxima en direcciones opuestas) y dos veces por el semieje menor (corriente mínima en direcciones opuestas). La inclinación da el ángulo del eje mayor, generalmente con respecto al este. La fase nos da el tiempo de ocurrencia de la corriente máxima dentro del periodo asociado a esa frecuencia, es decir, cuando el vector de corriente se encuentra sobre el semieje mayor dado por el ángulo de inclinación. Es importante notar que la corriente pasa por el eje mayor dos veces durante un periodo determinado, y por tanto la inclinación y la fase tienen una ambigüedad de 180° . Es decir, le podemos restar o sumar, simultáneamente, 180° a la inclinación y a la fase, y la elipse de marea es exactamente la misma. Para obtener los parámetros de la elipses de marea, el análisis armónico se realizó usando el paquete `t_tide` de Matlab (Pawlowicz *et al.*, 2002).

2.5. Teoría de las ondas internas de gravedad

Las mareas internas por definición, son ondas internas de gravedad con frecuencias inducidas por las corrientes de marea que se generan al interactuar con cambios topográficos en presencia de estratificación, por lo que, para entender su propagación, se debe analizar la propagación de las ondas internas en general. En este caso se desarrolla la teoría de ondas internas con enfoque en frecuencias de mareas, y se siguió el desarrollo realizado por Gerkema (2019).

La fuerza restauradora de las ondas internas es la gravedad a través de la fuerza de flotación, la cual se caracteriza mediante la frecuencia de Brunt-Väisälä, que es un límite importante, junto con la frecuencia de Coriolis, para la existencia de ondas internas. El cuadrado de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N^2) está dada por:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_*} \left(\frac{d\rho_0}{dz} + \frac{\rho_0 g}{c_s^2} \right) \quad (1)$$

donde g es la gravedad, ρ_0 la densidad en estado de reposo, ρ_* una densidad representativa constante y c_s la velocidad del sonido en el agua. N^2 es una cantidad positiva para una estabilidad hidrostáticamente estable y el segundo término solo se hace importante a grandes profundidades donde la compresión del agua de mar puede ser comparable a la variación vertical de la densidad.

Además, se define la fuerza de flotación (por unidad de masa) b , a partir de la perturbación de la densidad y haciendo la aproximación de Boussinesq se expresa esta fuerza como:

$$b = -g \frac{\rho'}{\rho_*} \quad (2)$$

donde ρ' es la perturbación de la densidad debida al movimiento. El sistema completo de ecuaciones lineales para perturbaciones pequeñas que considera los cambios de presión, los movimientos en la horizontal y vertical, la aceleración en las 3 dimensiones y los cambios de las perturbaciones en la densidad, es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho_*} \frac{\partial P'}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho_*} \frac{\partial P'}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_*} \frac{\partial P'}{\partial z} + b \quad (5)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + N^2 w = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Se obtiene una sola ecuación para w , ya que las condiciones de frontera en superficie y fondo son más sencillas para la velocidad vertical. Siguiendo el procedimiento realizado por Gerkema (2019) se manipula el sistema para llegar a una sola ecuación para la componente vertical de la velocidad:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\nabla^2 w) + f^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + N^2 \nabla_h^2 w = 0 \quad (8)$$

donde ∇^2 es el laplaciano en tres dimensiones y ∇_h^2 es el laplaciano horizontal (en las coordenadas x y y). A continuación, se considera una solución oscilatoria de la forma:

$$w = W(x, y, z)e^{-i\omega t}$$

donde W es una función del espacio y ω una frecuencia dada (una frecuencia de marea, por ejemplo). La ecuación anterior se sustituye en (8) y se considera que las coordenadas horizontales son simétricas, por lo que sin pérdida de generalidad se pueden seleccionar ondas planas que se propaguen en cualquier dirección en la horizontal. Gerkema (2019) continua su desarrollo matemático con ondas que se propagan en x y son uniformes en y obteniendo la siguiente ecuación de onda en las coordenadas espaciales (ecuación hiperbólica para valores típicos de f y N en el océano):

$$(f^2 - \omega^2) \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + (N^2 - \omega^2) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0 \quad (9)$$

A partir de aquí, Gerkema (2019) indica que existen dos maneras de continuar, una es a través de modos normales y la otra por coordenadas características, cada una de las cuales tienen sus ventajas individuales. Para los modos normales no es necesario considerar N constante y se resuelve mediante autofunciones correspondientes a un número de onda k_n . Mientras que utilizando las coordenadas características es necesario contemplar una N constante, pero ayudan a describir y resaltar la propagación diagonal de las ondas internas.

Para describir el movimiento de las ondas por medio de las coordenadas características se debe asumir que la frecuencia entrará en uno de dos posibles intervalos para hacer efectiva la teoría:

$$|f| < \omega < N \quad ; \quad N < \omega < |f|$$

Para las frecuencias de marea y la mayor parte del océano aplica el primer rango, ya que la frecuencia de marea que pueda estar asociada a las ondas internas debe estar dentro de este rango y así es posible que se propague (Petruncio *et al.*, 1998). Sin embargo, es importante resaltar que la zona de estudio está ubicada cerca de los 31° de latitud, por lo que la banda diurna queda fuera del rango establecido.

Se propone una solución armónica para W :

$$W \sim e^{i(kx+mz)}$$

y se sustituye en (9) para obtener la relación de dispersión, que concuerda con la relación que se puede obtener con modos normales verticales (con N constante):

$$\omega^2 = \frac{N^2 k^2 + f^2 m^2}{k^2 + m^2} \quad (10)$$

Se reescribe la relación de dispersión a partir de escribir las componentes del vector número de onda $\vec{K} = (k, m)$ en coordenadas polares:

$$\vec{K} = \kappa(\cos \theta, \sin \theta)$$

donde $\kappa = \sqrt{k^2 + m^2}$ es la magnitud del vector número de onda y θ es el ángulo que forma $\vec{K}$ con el eje x . A realizar la sustitución de la expresión anterior, la relación de dispersión (10) se expresa ahora como:

$$\omega^2 = N^2 \cos^2 \theta + f^2 \sin^2 \theta \quad (11)$$

La relación de dispersión resultante ejemplifica la esencia de la teoría de las ondas internas, ya que involucra a los parámetros N que es proporcional a la fuerza restauradora de las ondas internas y f el efecto de Coriolis. La frecuencia de la onda depende solo del ángulo θ (su dirección de propagación) y no de κ y por lo tanto de la longitud de onda. Nótese que dentro de la aproximación de N constante y para una frecuencia fija, como las de marea, (11) define un ángulo fijo con respecto a la horizontal.

Como consecuencia de que la frecuencia no depende de la longitud de onda la componente de la velocidad de grupo $\partial\omega/\partial\kappa$, es cero. Para obtener una expresión de la velocidad de grupo se recurre a la regla de la cadena para expresar la derivada de ω , ya que las componentes del vector número de onda en coordenadas polares dependen del ángulo (θ) y de la longitud del vector número de onda (κ):

$$\omega(k(\kappa, \theta), m(\kappa, \theta))$$

A partir de esta dependencia podemos calcular una expresión para $\partial\omega/\partial\kappa$ de (11) que sabemos que es igual a cero:

$$\frac{\partial\omega}{\partial\kappa} = \frac{\partial\omega}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial\kappa} + \frac{\partial\omega}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial\kappa} = \frac{\vec{C}_g \cdot \vec{K}}{\kappa} = 0 \quad (12)$$

donde $\vec{C}_g$ es el vector de la velocidad de grupo, cuyas componentes y expresiones en coordenadas cartesianas pero en términos de κ y θ es:

$$\vec{C}_g = \left(\frac{\partial\omega}{\partial k}, \frac{\partial\omega}{\partial m} \right) = \frac{(N^2 - f^2) \sin \theta \cos \theta}{\kappa \omega} (\sin \theta, -\cos \theta) \quad (13)$$

La expresión (12) establece que el producto punto del vector de velocidad de grupo y el vector número de onda se anula, lo que significa que:

$$\vec{C}_g \perp \vec{K}$$

Es decir, la velocidad de grupo y el vector número de onda son perpendiculares. Esta es una de las características fundamentales de las ondas internas, ya que a pesar de que las fases tienen una dirección de propagación definida por $\vec{K}$ la energía viaja perpendicular a este vector. Además, de (13) y la expresión de $\vec{K}$ en coordenadas polares, se puede ver que las componentes verticales de la velocidad de grupo y del vector número de onda tienen signos contrarios, de tal manera que si la velocidad de grupo se propaga hacia arriba, las fases lo hacen hacia abajo y viceversa.

Otra expresión útil que se deriva de la relación de dispersión se obtiene al multiplicar el lado izquierdo de (11) por $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ para obtener:

$$\cot^2 \theta = \frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2} = \alpha^2 \quad (14)$$

La cual nos da la dirección de la velocidad de grupo, ya que, si denotamos por ϕ el ángulo de la velocidad de grupo, entonces de (13) tenemos:

$$\tan \phi = -\cot \theta = \pm \alpha = \pm \left(\frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Al usar la expresión (15) se puede escribir la ecuación (9) como:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \alpha^2 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = 0 \quad (16)$$

Como resultado se obtiene una ecuación hiperbólica en las coordenadas espaciales (x, z) , y en analogía a la ecuación unidimensional de onda se tiene una solución general de la forma:

$$W = F(z + \alpha x) + G(z - \alpha x) \quad (17)$$

donde F y G son funciones arbitrarias, y sus argumentos son los conocidos como coordenadas características, de ahí el nombre del método, dadas por:

$$\xi = z + \alpha x ; \eta = z - \alpha x$$

Las funciones F y G en (17) son constantes cuando ξ y η son constantes, es decir a lo largo de las rectas dadas por:

$$z + \alpha x = c_1 \quad \text{y} \quad z - \alpha x = c_2$$

donde c_1 y c_2 son constantes. Pero de (15) se observa que las pendientes de estas dos familias de rectas son precisamente lo que define la dirección de la velocidad de grupo. Por lo tanto (17) indica que la solución se propaga a lo largo de las rectas características que definen la dirección de la velocidad de grupo. A las rectas características también se les conoce como rayos. Nótese que la energía se propaga a lo largo de los rayos, y las fases se propagan perpendicularmente a los rayos y verticalmente en sentido contrario.

En el caso de las mareas internas, estas se generan en el fondo, cuando las corrientes de marea fluyen a lo largo de una pendiente del fondo y hacen oscilar las isopícnas. En este caso los rayos irán del fondo hacia la superficie y las fases se propagarán en sentido perpendicular a los rayos, pero hacia abajo, siempre confinadas dentro del rayo. Los rayos se reflejan hasta llegar a la superficie y mediante múltiples reflexiones entre superficie y fondo pueden propagarse a distancias considerables del área de generación.

Gerkema (2019) explica que esta forma de W crea estructuras que se alinean con los rayos que describen la propagación de las ondas en el plano (x, z) . En teoría es un método directo para seguir la secuencia de rayos conforme se propaga una onda, en cambio, con el desarrollo por modos normales se necesita una gran cantidad de modos para que se pueda diferenciar una estructura en forma de rayo. Sin embargo, para situaciones más realistas en que N^2 varía en la vertical, la solución por modos normales es la más viable. Además, la solución confinada a rayos estrechos para una N^2 constante, se puede ver bastante distorsionada en presencia de una N^2 variable debido a la dispersión ("scattering") provocada por las variaciones en la estratificación y reflexión con el fondo.

Capítulo 3. Resultados

3.1. Estadísticas básicas

3.1.1 Promedio y desviación estándar de las corrientes

El promedio de la componente u (Figura 5a) en el anclaje A01 es predominante hacia el oeste en casi toda la columna de agua a excepción de cerca del fondo. En el caso de la componente v (Figura 5c) el promedio predomina en dirección hacia el sur, con un cambio de signo cercano a la superficie, lo que indica flujo hacia el noroeste cerca de la superficie, y flujo saliendo de la bahía (hacia el suroeste) en casi todo el resto de la columna de agua. Los valores máximos de la desviación estándar de la componente u (Figura 5b) están cerca del fondo y son prácticamente exclusivos de alta frecuencia. Para la componente v (Figura 5d) su máxima desviación estándar se presenta cerca de la superficie, pero en la mayoría de la columna de agua predomina la alta frecuencia como en la componente u .

Los promedios de las componentes u (Figura 5e) y v (Figura 5g) del anclaje A02 presentan valores cercanos a cero a lo largo de gran parte de la columna de agua, mientras que u aumenta hacia el oeste a 200 m de la superficie, v aumenta hacia el norte cerca de la misma profundidad que u . Con respecto a la desviación estándar de la componente u (Figura 5f), en la mitad inferior de la columna de agua la mayoría de la energía está en las altas frecuencias. Sin embargo, aproximadamente a los 250 metros del fondo la desviación estándar de la alta frecuencia disminuye y es menor que la de baja frecuencia conforme disminuye la profundidad. La desviación estándar de esta componente u junto a la componente v (Figura 5h) muestran un comportamiento similar a las desviaciones estándar del anclaje A01 e indican predominancia de periodos menores a 36 h cerca del fondo.

En el anclaje A03 el promedio de la componente u (Figura 5i) tiene su cruce por cero a media agua (alrededor de 200 m de del fondo). De manera similar la componente v (Figura 5k), tiene su cruce por cero alrededor de la misma distancia del fondo. En la desviación estándar de la componente u (Figura 5j) la alta frecuencia no contiene la mayoría de la energía como en los otros anclajes. Mientras que la desviación estándar de la componente v (Figura 5l) es aproximadamente constante en casi toda la columna y aumenta de 200 m a superficie. A diferencia de los otros anclajes el aumento de las altas frecuencias cerca del fondo es menor.

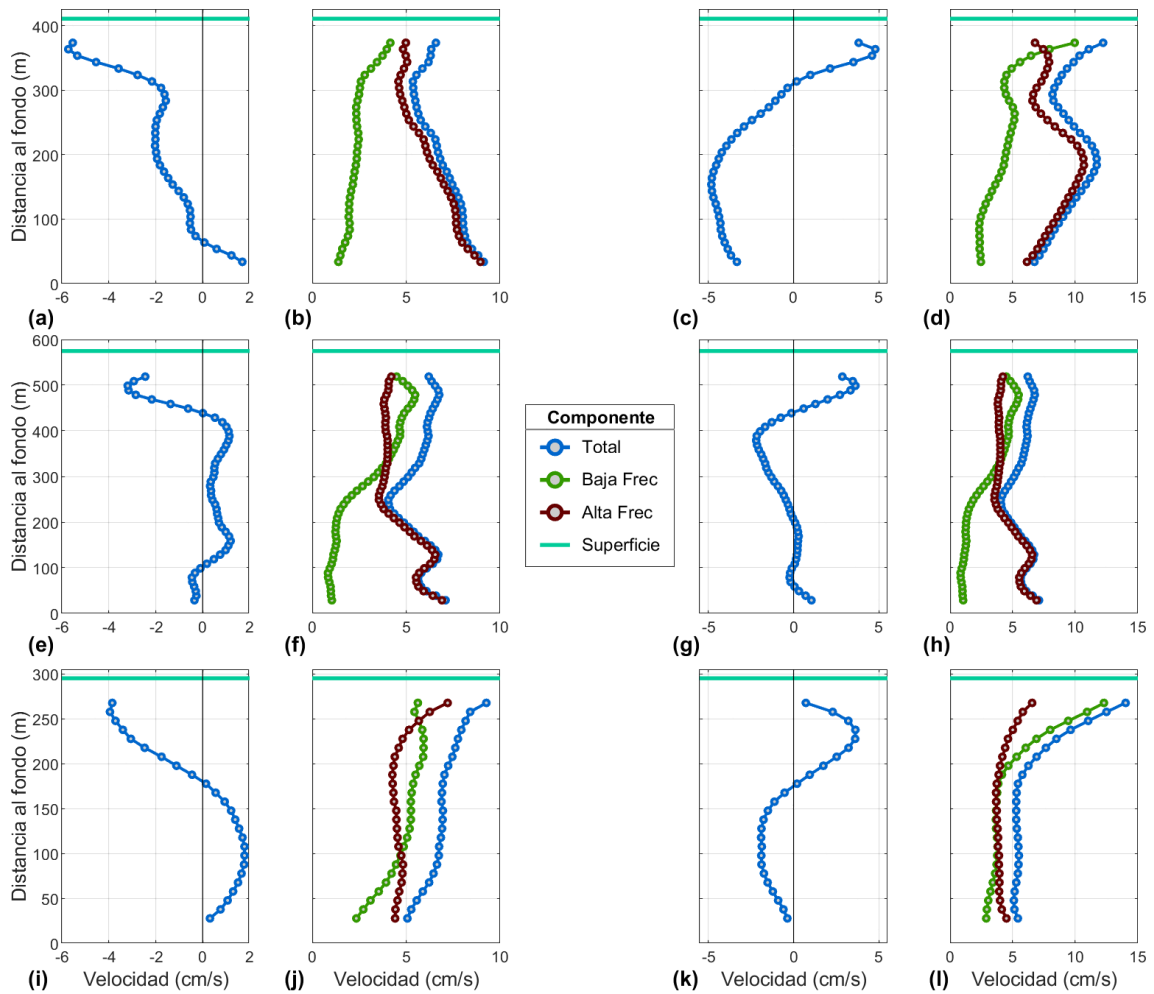


Figura 5. Estadísticas básicas calculadas a las componentes u (este-oeste) y v (norte-sur) de la corriente. De izquierda a derecha se muestra (a) el promedio y (b) desviación estándar de u , mientras que (c) y (d) corresponden a al promedio y desviación estándar de v del anclaje A01. Paneles (e), (f), (g) y (h), igual que (a), (b), (c) y (d) para el anclaje A02. Paneles (i), (j), (k) y (l), igual (a), (b), (c) y (d) para el anclaje A03.

3.1.2 Ángulo del eje principal o de máxima varianza

Las orientaciones del eje de máxima varianza a lo largo de la columna de agua son diferentes para cada anclaje, ya que los tres están ubicados en diferentes partes del cañón y la corriente se ve influenciada por la disposición de la batimetría. Además, la orientación cambia en la vertical en cada anclaje. En la Figura 6 se muestra el eje de máxima varianza de las corrientes totales y de alta frecuencia de cada anclaje.

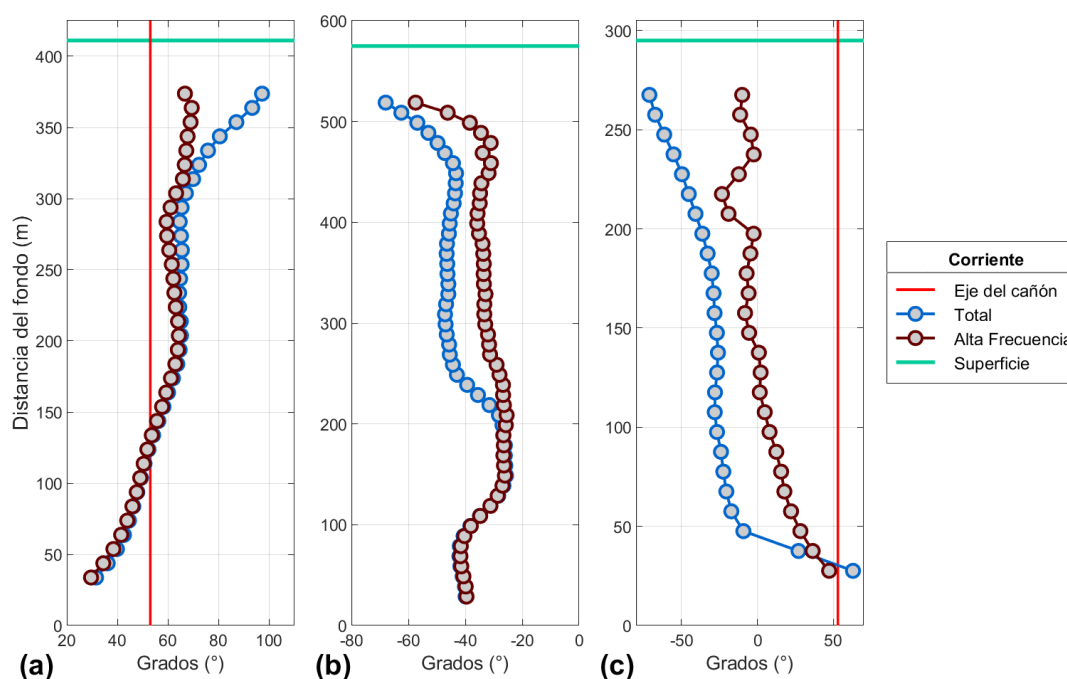


Figura 6. Ángulo de inclinación del eje principal (máxima varianza). Donde (a) corresponde a A01, (b) a A02 y (c) a A03. En (a) y (c) la línea vertical roja corresponde a la dirección del eje del cañón.

El anclaje A01 (Figura 6a) estuvo ubicado sobre el eje del cañón y alrededor de los 100-150 m del fondo la orientación del eje de máxima varianza se alinea con el eje del cañón. En el resto de la columna el eje principal de las corrientes de alta frecuencia se desvía aproximadamente hasta un máximo de $\pm 20^\circ$ del eje del cañón. Como el anclaje A02 (Figura 6b) estuvo ubicado sobre la pendiente del cañón exterior, a ninguna profundidad el eje de máxima varianza se alinea con el eje del cañón, manteniéndose alrededor de -40° en casi toda la columna de agua. Nótese que la orientación de las corrientes es aproximadamente paralela a las isóbatas locales (Figura 2). El anclaje A03 (Figura 6c) es similar a A02, ya que también está sobre una de las paredes del cañón, en específico la que está del lado de la Punta Banda. Sin embargo, a diferencia de A02, en el fondo la corriente total se acerca a la inclinación del eje del cañón.

3.1.3 Promedio y desviación estándar de la temperatura

En los promedios de la temperatura (Figura 7a) se observa la variación vertical en el anclaje A01 que a lo largo del periodo analizado se tuvo un rango de alrededor de 3.5°C . El microcat más somero estuvo a los 64 m de profundidad, por lo que se perdió la variabilidad estacional de la termoclina y bajo esta, el perfil de temperatura es prácticamente lineal. Con respecto a los ADCP's, el anclaje A02 es el de menor

temperatura mientras que el anclaje A03 es el que obtuvo la temperatura promedio más elevada, consistente con las profundidades del fondo en cada uno de los anclajes. A diferencia de las corrientes, la desviación estándar (Figura 7b) de los microcats y temperatura de los ADCP's, la alta frecuencia es menor que la de la baja frecuencia, sobre todo cerca de la superficie.

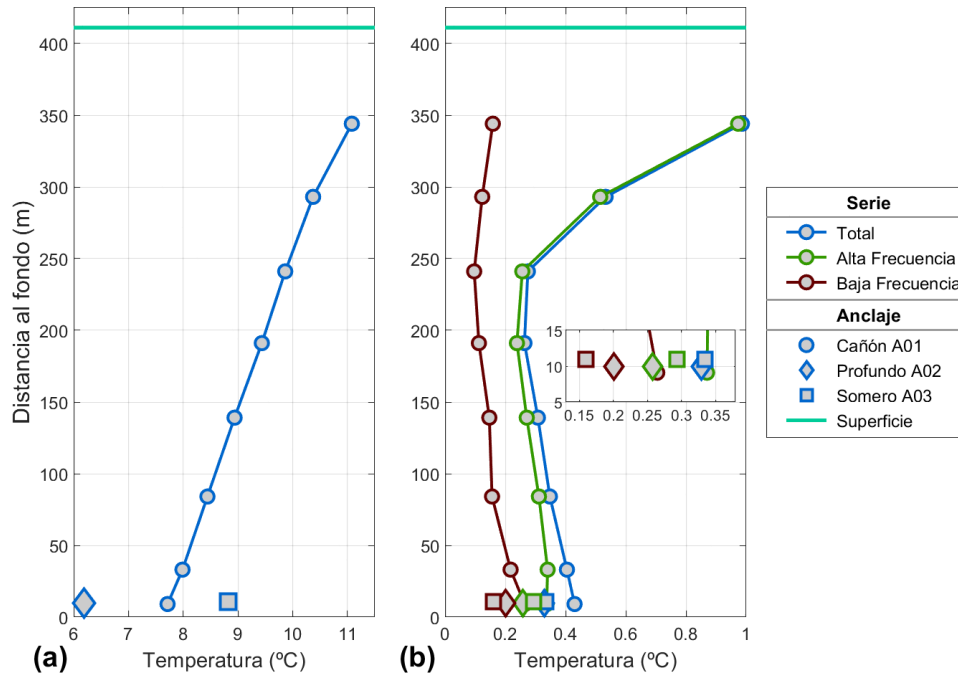


Figura 7. Estadísticas básicas calculadas a los datos de temperatura obtenidos de 8 microcats instalados en A01 y los ADCP's en los anclajes A02 y A03. (a) Promedio temporal y (b) su desviación estándar. El recuadro en (b) muestra el detalle de los instrumentos más cercanos al fondo.

3.2. Espectros

Con el objetivo de encontrar en qué frecuencias existe concentración de energía se calcularon espectros escalares (temperatura) y rotacionales (corrientes) a las series de tiempo disponibles. En los tres anclajes las mayores concentraciones se encontraron en las bandas de frecuencias diurna (incluye la inercial), semidiurna y baja frecuencia ($f \leq 0.3$ cpd). A pesar de no ser observadas en los espectros de color (v.gr. Figura 8a), las bandas teridiurna y cuartidiurna aparecen en algunos espectros individuales.

A partir de los espectros calculados a las series de temperatura de los microcats se obtuvo la Figura 8a donde se observa que la mayor concentración de densidad de energía espectral se encuentra en bajas frecuencias en toda la columna de agua, especialmente en la superficie seguido por la banda semidiurna, y con menor concentración en la diurna. Al seleccionar los espectros calculados a partir de las series

obtenidas por los microcats más profundo (Figura 8b) y más somero (Figura 8c) se observa que en la banda semidiurna de ambos extremos de la columna de agua se encuentra el pico más energético del espectro, en la frecuencia de marea M_2 . Mientras que en la banda diurna se observan dos picos en las frecuencias de las constituyentes O_1 y K_1 que en ambos casos son menos energéticas que el de la banda semidiurna. Además, se observa una ausencia de energía en la frecuencia inercial. Aunque no se comparan con la banda semidiurna, se observan dos picos correspondientes a las bandas teridiurna y cuartidiurna.

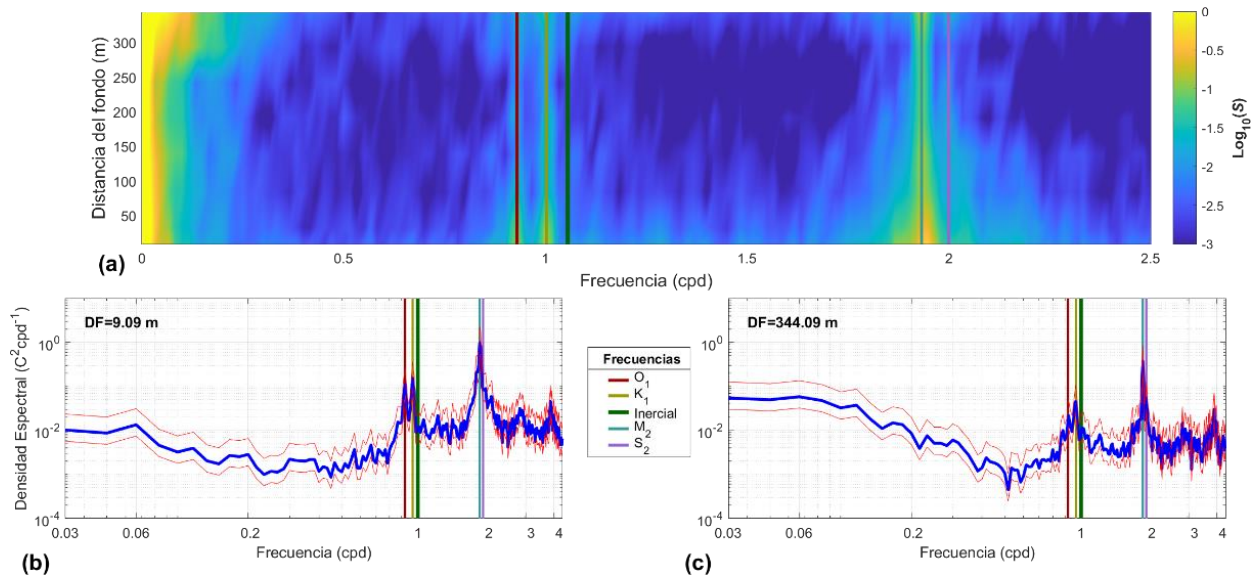


Figura 8. Espectros de densidad de energía calculados a partir de las series de temperatura de los microcats. En (a) se muestra la distribución del logaritmo de la densidad de energía espectral (S), en (b) el espectro de la serie del microcat más somero; y (c) el espectro de la serie del microcat más profundo. La línea roja en (b) y (c) representa el intervalo de confianza y DF es la distancia al fondo en la que se ubicó el microcat correspondiente al espectro. Las líneas verticales corresponden a diferentes frecuencias señaladas en la leyenda.

En la Figura 9 se muestran los espectros correspondientes a las series de temperatura registradas por los ADCP's de los anclajes A02 y A03. La gráfica correspondiente al anclaje A02 (Figura 9a) muestra al igual que el espectro del microcat más profundo del anclaje A01 (Figura 8b), que el pico más energético es el correspondiente a la banda semidiurna seguido por el de la banda diurna, que se divide en dos, el más energético correspondiente a la frecuencia K_1 seguido por O_1 . En el panel inferior (Figura 9b), correspondiente al espectro calculado a partir de la serie del anclaje A03, continúa predominando la banda semidiurna. A diferencia de los otros dos anclajes, los picos en altas frecuencias son más definidos y en el caso de la banda cuartidiurna, su magnitud es similar a la banda diurna.

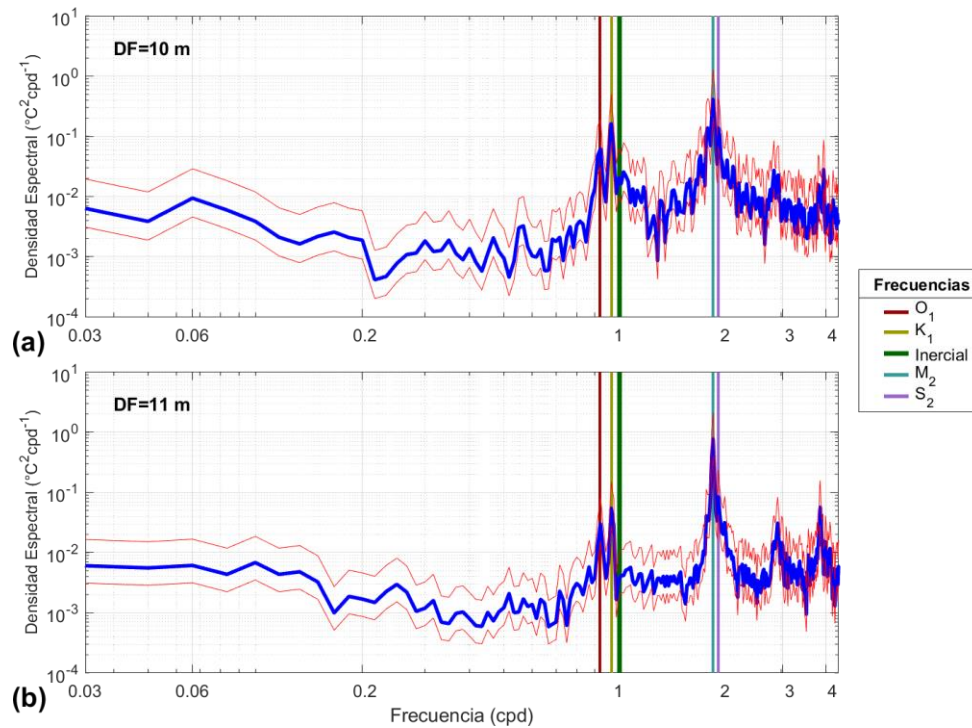


Figura 9. Espectros calculados a partir de las series de temperatura registradas por los ADCP's de los anclajes A02 (a) y A03 (b). La línea roja en (b) y (c) representa el intervalo de confianza y DF es la distancia al fondo en la que se ubicó el microcat correspondiente al espectro. Líneas verticales igual que en la Figura 8.

Los espectros rotacionales correspondientes al anclaje A01 (Figura 10) fueron calculados a partir de la corriente total (Figura 10a) y su componente baroclínica (Figura 10b). En ambas corrientes (total y baroclínica) se tiene un máximo de concentración de energía en bajas frecuencias en superficie y esta disminuye con la profundidad. La banda diurna presenta energía en ambas componentes, K_1 y O_1 , a lo largo de toda la columna de agua. La banda semidiurna es la más energética, tanto en la corriente total (Figura 10a) como en la componente baroclínica (Figura 10b). La energía en esta banda se distribuye en toda la columna de agua en una frecuencia ligeramente menor a los 2 cpd, ubicada en la frecuencia M_2 . Se observa que la energía de las corrientes baroclínicas de marea es comparable a la de las corrientes totales en gran parte de la columna de agua, sobre todo para la banda semidiurna.

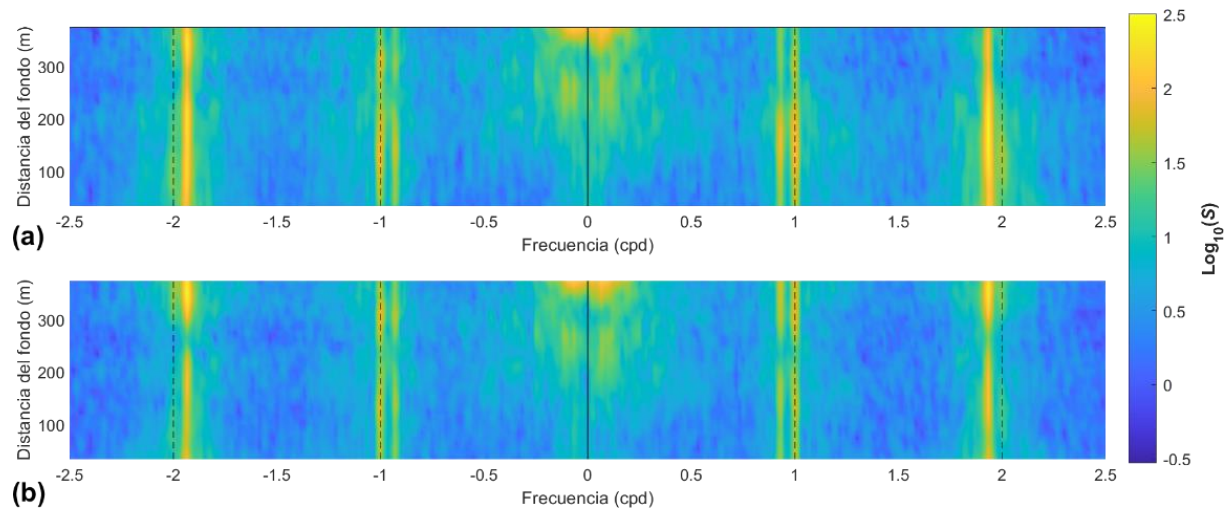


Figura 10. Espectro rotacional mostrando el logaritmo de la densidad de energía espectral (S) en el anclaje A01, donde (a) es la energía existente en la corriente total y (b) en la componente baroclínica. Las líneas verticales marcan las frecuencias de 1 y 2 cpd, tanto para frecuencias positivas, como negativas.

A pesar de que la Figura 10 representa la energía espectral en toda la columna de agua, es conveniente observar los espectros individuales correspondientes a los extremos de la columna de agua (Figura 11). En particular, se puede ver como varía la energía en las bandas diurna, semidiurna, en bajas y altas frecuencias (mayores a la semidiurna). Para las corrientes en ambas profundidades, la banda semidiurna es la más energética, y únicamente se tiene un pico en la frecuencia de la constituyente de marea M_2 , mientras que en la banda diurna se observan, con menor energía dos picos definidos correspondientes a las constituyentes K_1 y O_1 . Cerca de la banda diurna se encuentra la frecuencia inercial, la cual no presenta un pico en ninguno de los casos.

Sin embargo, se observa una diferencia entre la energía espectral en frecuencias bajas y altas con respecto a los cambios de profundidad. Cerca de la superficie (Figura 11a) se observa una mayor concentración de energía en bajas frecuencias equiparable a la banda diurna y esta disminuye considerablemente cerca del fondo (Figura 11b). Cerca del fondo (Figura 11b) la energía de las bandas teridiurna y cuartidiurna en frecuencias negativas son comparables a la de la banda diurna. Mientras que en superficie (Figura 11a) la banda teridiurna casi desaparece y la banda cuartidiurna disminuye.

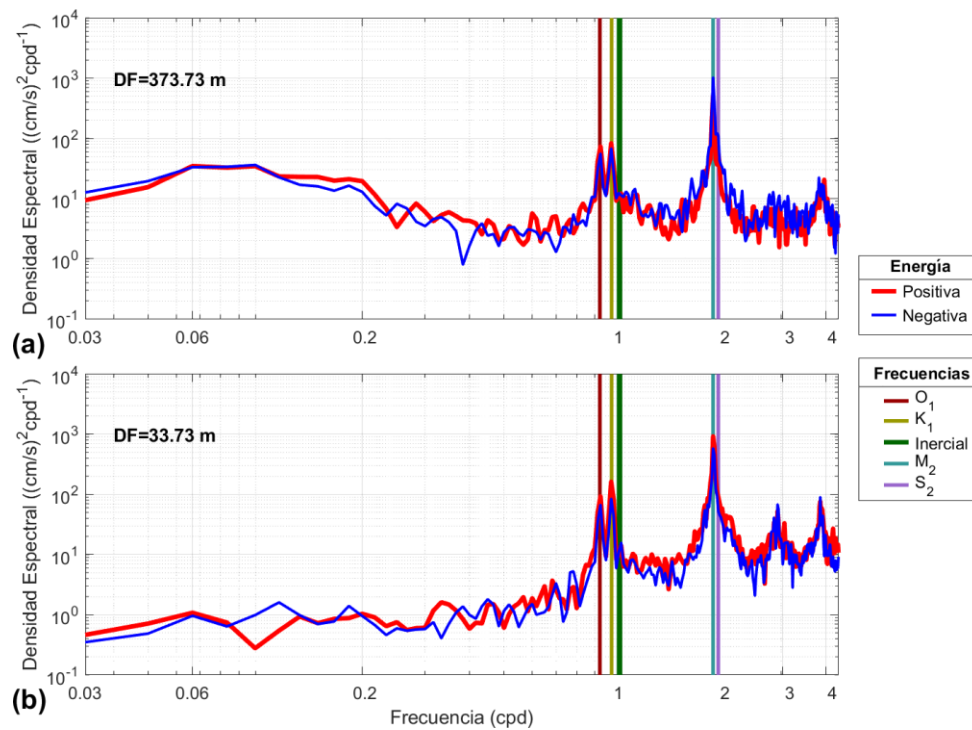


Figura 11. Espectros rotacionales calculados a partir de las celdas más profunda (a); y más somera (b) del ADCP del anclaje A01. DF es la distancia al fondo. Las frecuencias positivas y negativas se muestran con líneas roja y azul, respectivamente. Líneas verticales igual que en la Figura 8.

Ya que aparentemente no hay energía en la frecuencia inercial (f), en la Figura 12 se hizo un acercamiento a la banda diurna de la Figura 10. Se observa que la energía en la frecuencia inercial (f) es mucho menor que la energía que se observa en las frecuencias de mareas diurnas (O_1 y K_1), tanto para las componentes polarizadas que rotan positivamente (frecuencias positivas), como para las que rotan negativamente (frecuencias negativas). También se puede apreciar que la energía presente en las corrientes baroclínicas de las mareas diurnas es esencialmente la misma que en las corrientes totales a excepción de los mínimos más pronunciados que se observan en las corrientes baroclínicas alrededor de los 250 m arriba del fondo. Nótese que en las frecuencias diurnas de marea son frecuencias subinerciales a la latitud de estas observaciones.

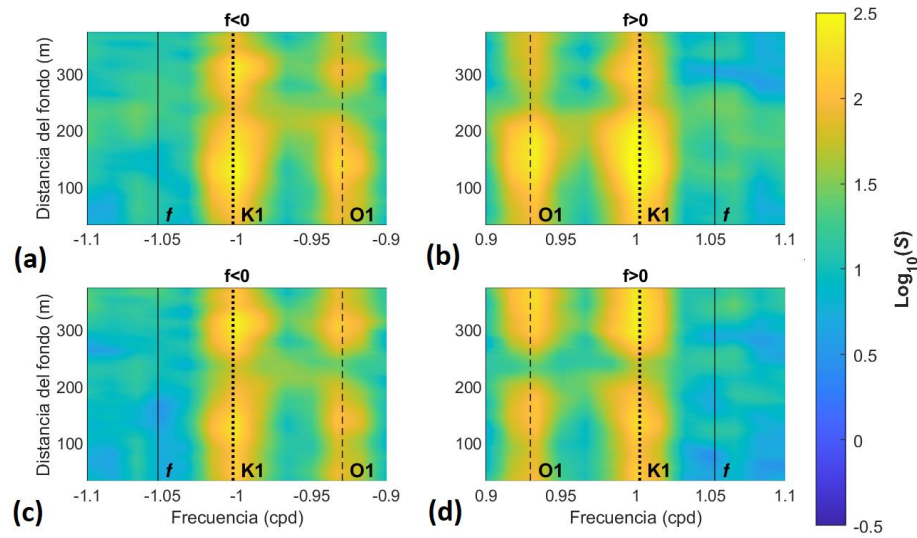


Figura 12. Acercamiento a la banda diurna en los espectros rotacionales del anclaje A01 (Figura 10). (a) y (b) corresponden a la corriente total, y para las frecuencias negativas y positivas respectivamente. Mientras que (c) y (d) corresponden a la componente baroclínica. Las unidades son el logaritmo base 10 de la densidad de energía espectral (S).

También para el anclaje A02 se calculó el espectro rotacional a la corriente total (Figura 13a) y a su componente baroclínica (Figura 13b). En comparación al anclaje A01 se tiene más energía en bajas frecuencias y menor en las bandas diurna y semidiurna. Como en el espectro del anclaje A01 se tiene una señal baroclínica significativa. Al observar los espectros individuales más somero (Figura 14a) y más profundo (Figura 14b), se obtienen resultados similares en cuanto a la variación de la energía en bajas frecuencias, la cual aumenta cerca de la superficie y disminuye hacia el fondo. Sin embargo, en el caso de las altas frecuencias no se tiene un pico en la banda cuartidiurna, mientras que en la banda teridiurna hay cierta energía cerca del fondo.

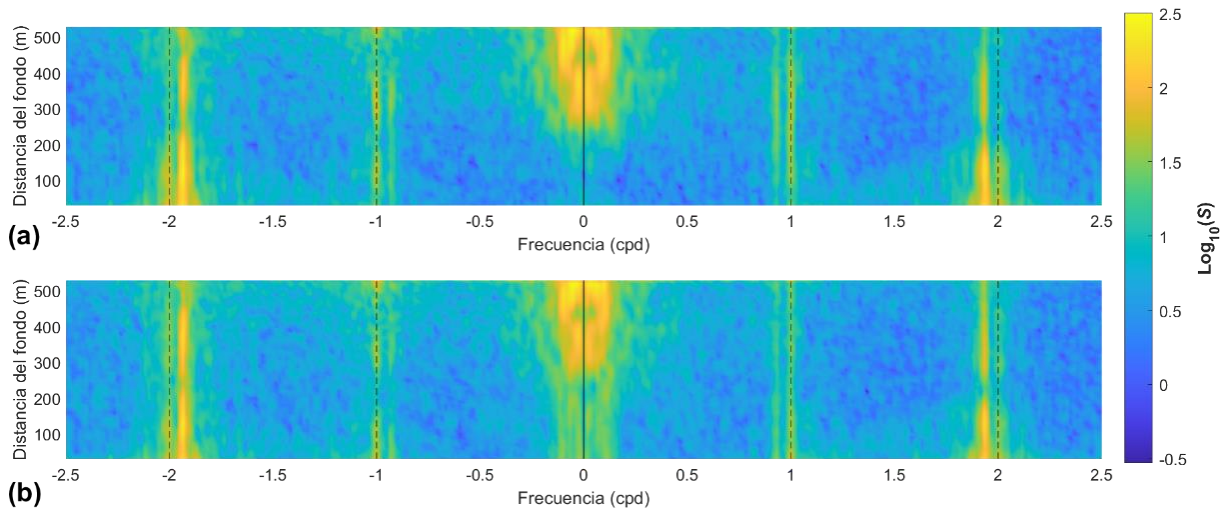


Figura 13. Igual que la Figura 10 pero para el anclaje A02.

Los picos energéticos se encuentran en las mismas bandas, sin embargo, estos varían en magnitud entre superficie y fondo. La banda semidiurna a diferencia de los otros anclajes es más ancha cerca del fondo (Figura 14b). Se tiene que el pico relacionado con la constituyente M_2 es el más energético, un pico correspondiente a la frecuencia de la S_2 y un tercer pico que podría estar relacionado con la constituyente N_2 ($f = 1.86$ cpd) apenas visible. Cerca de la superficie (Figura 14a), y solo en este anclaje, el pico correspondiente a la constituyente K_1 es el que contiene mayor densidad de energía superando a la de la banda semidiurna. Con respecto a la banda diurna, se observa que en superficie se tiene la ausencia del pico correspondiente a la constituyente O_1 .

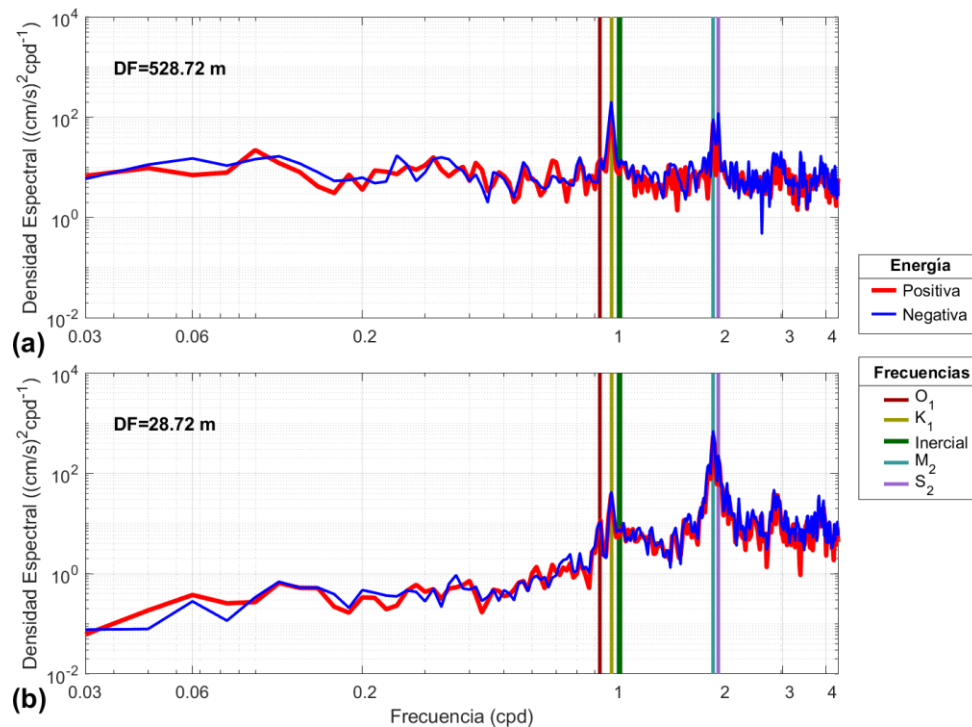


Figura 14. Igual que la Figura 11 pero para el anclaje A02.

Para observar mejor las variaciones en la banda diurna y visualizar la frecuencia inercial se realizó un acercamiento a la banda diurna (Figura 15). Se puede apreciar que hay una menor concentración de energía en comparación al anclaje A01. En las frecuencias negativas y positivas, se observa como la energía no está distribuida uniformemente en la columna de agua para las constituyentes K_1 y O_1 (Figura 15a y b), lo cual muestra que las corrientes son fundamentalmente baroclínicas. Aunque en este anclaje las frecuencias de marea diurnas tienen mucho menos energía que en el anclaje A01, la energía en la

frecuencia inercial es también prácticamente despreciable comparada con la energía presente en las frecuencias de marea diurna.

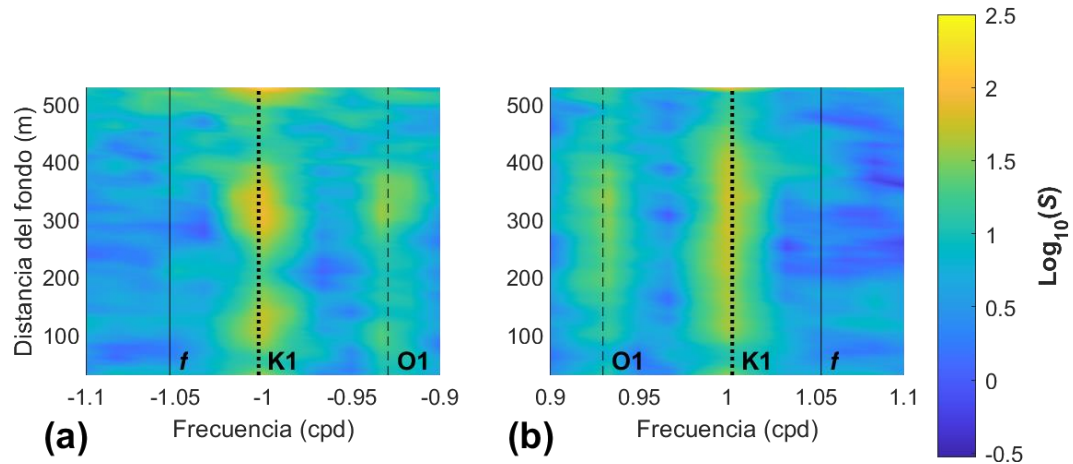


Figura 15. Igual que la Figura 12 para el anclaje A02 y para la corriente total exclusivamente.

Por último, la Figura 16 muestra los espectros calculados a partir de las series de corrientes del anclaje A03. Se observa que es el menos energético de los tres anclajes. Presenta menos energía en las bandas diurna y semidiurna, y la banda de mayor energía parece ser la de baja frecuencia con una distribución más uniforme en la columna de agua. Después de la baja frecuencia, la banda más energética es la banda semidiurna. Estas características aplican para ambos espectros, tanto para el de la corriente total (Figura 16a) como el de la componente baroclínica (Figura 16b).

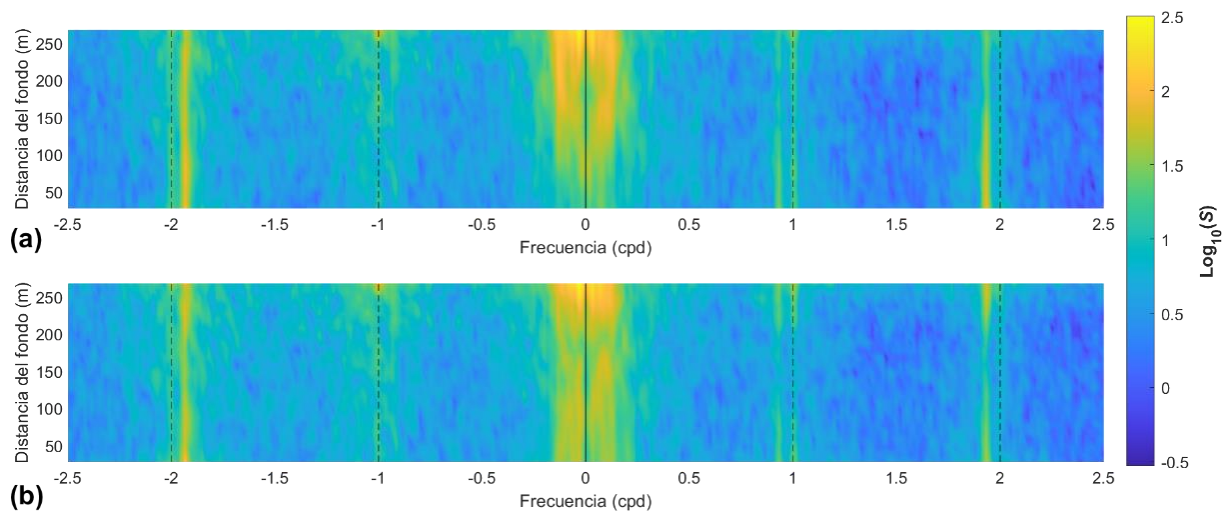


Figura 16. Igual que la Figura 10 pero para el anclaje A03.

En la Figura 17 se muestran los espectros individuales correspondientes a las series más somera (Figura 17a) y más profunda de la corriente total (Figura 17b) del anclaje A03. La característica principal de este anclaje es que la energía en frecuencias negativas es mayor que las positivas en superficie, y en fondo en la banda semidiurna y mayores frecuencias. En superficie el espectro (Figura 17a) muestra la mayor energía en bajas frecuencias. Las bandas diurna y semidiurna presentan aproximadamente los mismos valores. En el fondo (Figura 17b) la energía de las bajas frecuencias es menor que la superficie. En la banda diurna aparece el pico de la O_1 que no está en la superficie y que en frecuencias positivas está al nivel de la K_1 . En la banda semidiurna la frecuencia M_2 es la más energética y la energía en altas frecuencias aumenta, pero no de manera relevante.

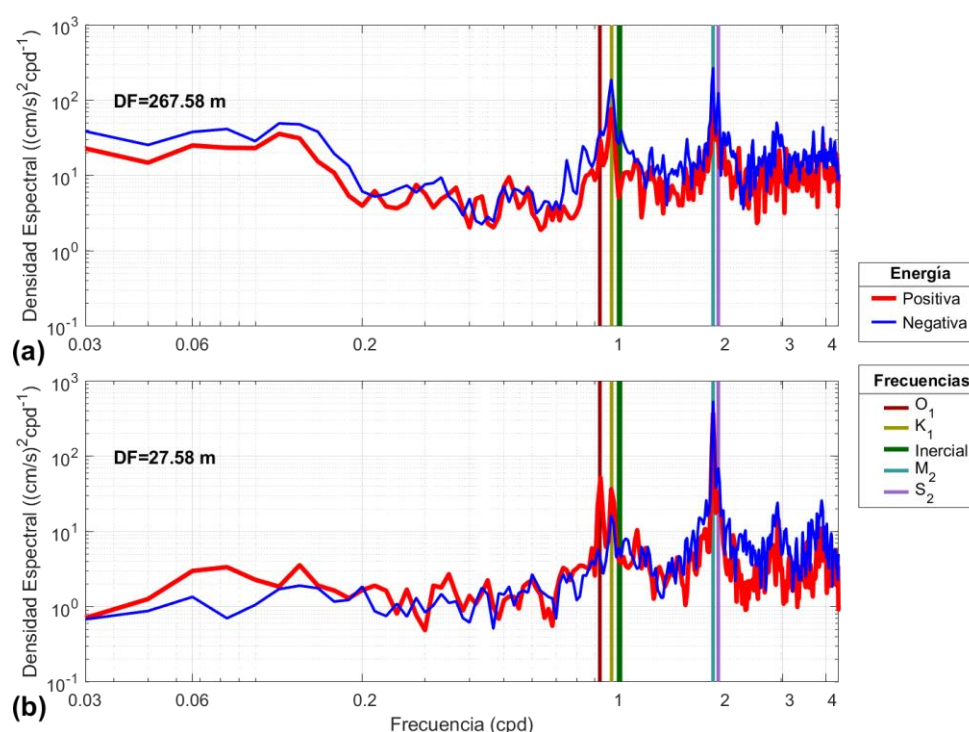


Figura 17. Igual que la Figura 11 pero para el anclaje A03.

En el acercamiento a la banda diurna del anclaje A03, se observa que en las frecuencias negativas (Figura 18a) la energía no está distribuida únicamente en las constituyentes diurnas, y hay cierta energía presente entre ambas frecuencias. El máximo de energía en esta banda está en la frecuencia K_1 en superficie y en menor medida a los 175 m del fondo. La distribución de energía en las frecuencias diurnas en este anclaje está muy localizada a ciertas profundidades, lo cual podría ser congruente con la presencia de rayos. Por otro lado, la energía de la frecuencia inercial sigue siendo pequeña comparada con la energía a las frecuencias de mareas diurnas.

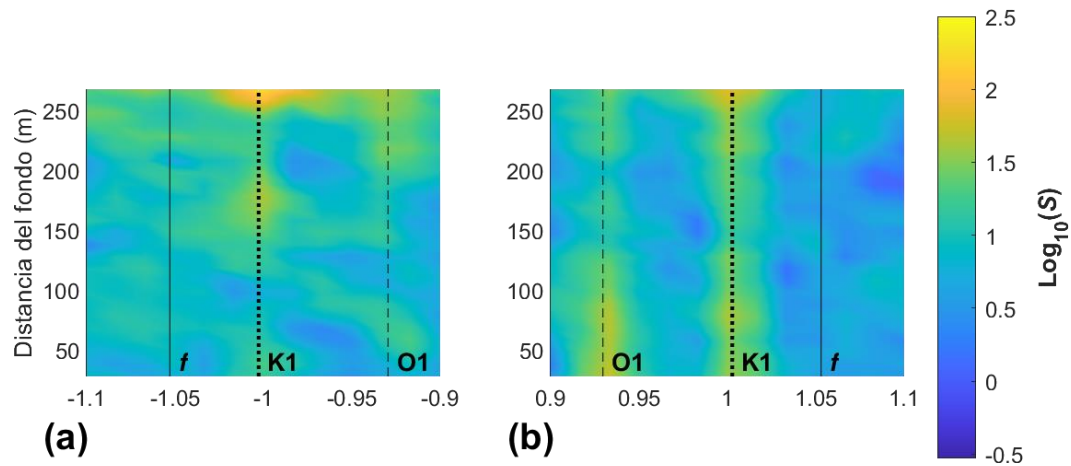


Figura 18. Igual que la Figura 15 pero para el anclaje A03.

3.3. Análisis armónico (AA)

Al realizar el AA de las series de tiempo disponibles de temperatura (los microcats del anclaje A01 y las series obtenidas con los ADCP's en los anclajes A01, A02 y A03) y la profundidad de la isoterma de 9°C extraída de las series de tiempo de los microcats, se obtuvo la varianza explicada correspondiente y las constituyentes de marea más energéticas por serie de tiempo, las cuales se muestran en la Figura 19. El resultado de la varianza explicada (Figura 19a) muestra que el anclaje A01 presentó los mayores porcentajes de varianza explicada. En el caso de los resultados de los datos de temperatura y profundidad de la isoterma de 9°C en el anclaje A01, los porcentajes de varianza explicada fueron altos (entre 40% y 70%). La varianza explicada en los anclajes A02 y A03 fue muy bajo con 4% y 3%, respectivamente.

Las cinco constituyentes más energéticas de todas las series se encuentran en las bandas diurna y semidiurna. En el anclaje A01 se observa que cerca del fondo (Figura 19b) la diurna K_1 es la más energética. Mientras que cerca de la superficie (Figura 19b) y para la profundidad de la isoterma de 9°C (Figura 19c), es la semidiurna M_2 . En los tres resultados del AA aparecen los satélites anuales de la M_2 : α_2 (H_1) y β_2 (H_2). El anclaje A02 resultó similar al anclaje A01, ya que su constituyente más energética es K_1 seguida por M_2 y O_1 , y con mucho menos energía siguen LDA_2 y MU_2 , dos constituyentes con amplitudes pequeñas en el potencial de mareas y las que tienen menor amplitud de todos los resultados. Mientras que el anclaje A03 tiene como constituyente más energética a la M_2 , seguida por las diurnas K_1 y O_1 .

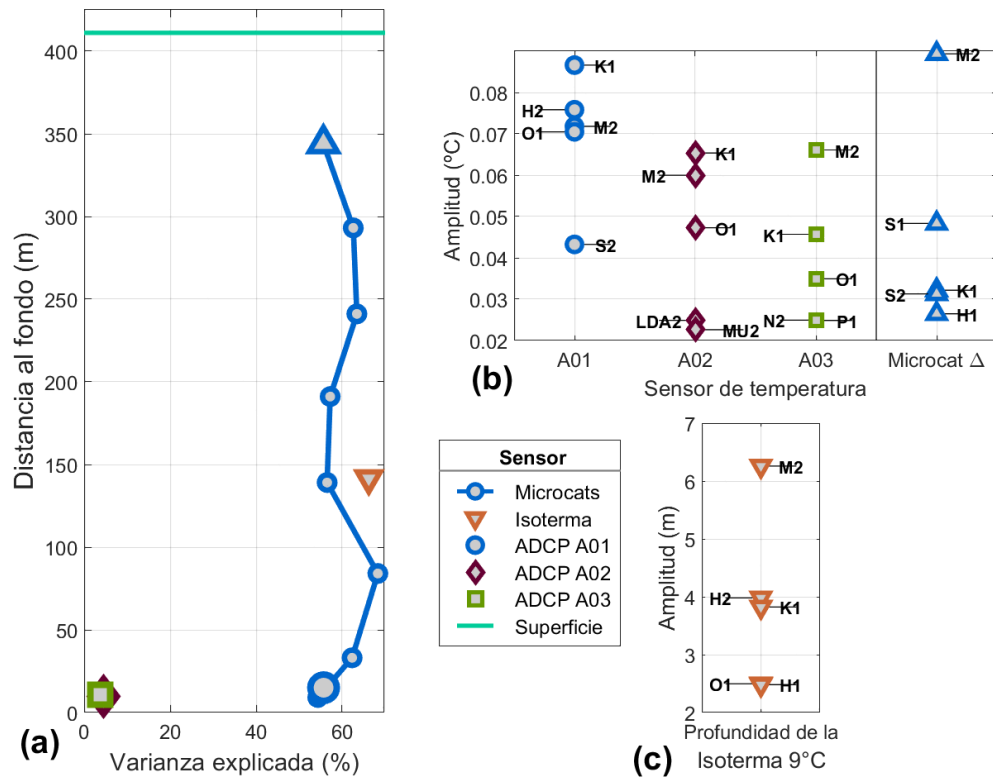


Figura 19. Porcentaje de varianza explicada y constituyentes más energéticas del AA realizado a las series de temperatura y de la profundidad de la isoterma de 9 °C extraída de los microcats. (a) Porcentaje de varianza explicada. (b) Cinco constituyentes más energéticas de las temperaturas registradas por los ADCP's de cada anclaje y microcat más somero en el anclaje A01 (recuadro del lado derecho); y (c) igual que (b) pero para la profundidad de la isoterma de 9°C. Las constituyentes α_2 y β_2 aparecen en los paneles como H1 y H2 respectivamente.

Similar a los resultados de las varianzas explicadas de la temperatura, los resultados del AA de las corrientes mostraron que el anclaje A01 cuenta con la mayor varianza explicada de los tres anclajes variando entre 15% y 40% (Figura 20a). Seguido por el anclaje A02 con máximos de 26% de varianza explicada (Figura 20b) y el anclaje A03 que no supera el 20% (Figura 20c). En los tres anclajes, las corrientes baroclínicas explican un porcentaje de varianza similar a la de las corrientes totales. La componente barotrópica del anclaje A01 es la que contó con la mayor varianza explicada con 41%, los anclajes A02 y A03 tuvieron 16% y 11%, respectivamente.

Las constituyentes más energéticas de cada anclaje (Figura 20d, e y f) se encuentran en las bandas diurna y semidiurna, consistente con los resultados de los espectros y los AA de la temperatura. De la banda diurna destaca la constituyente K_1 , que aparece entre las cinco constituyentes más energéticas en todas las corrientes de los tres anclajes. La constituyente O_1 aparece en la corriente total y baroclínica en cuarto lugar del anclaje A01 (Figura 20d). En los otros dos anclajes aparece en todas las corrientes. Otra constituyente de la banda diurna que aparece, pero solo en el anclaje A01 es la S_1 . Se encuentra en quinto

lugar en las corrientes total y barotrópica, y en cuarto de la componente baroclínica. Por último, aparece la constituyente P_1 en el anclaje A02. P_1 es la quinta más energética del potencial de mareas (Gerkema, 2019), pero en este estudio no destaca.

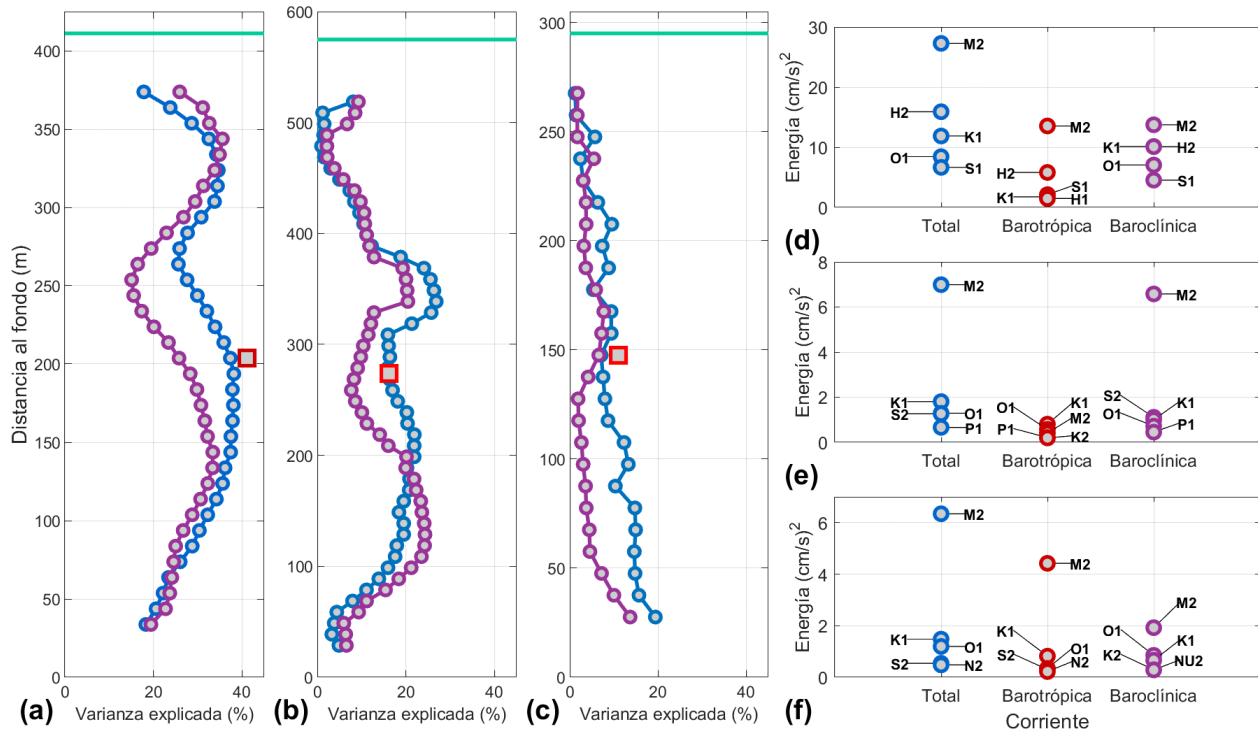


Figura 20. Varianzas explicadas de los análisis armónicos realizados a las series de corrientes totales (línea azul), componente barotrópica (cuadro rojo) y componente baroclínica (línea morada) de los tres anclajes: (a) A01, (b) A02 y (c) A03. Además, se grafican las cinco constituyentes más energéticas de cada corriente por anclaje: (d) A01, (e) A02 y (f) A03. La energía de la corriente total y la componente baroclínica están promediadas en la vertical. Las constituyentes α_2 y β_2 aparecen en los paneles como H1 y H2, respectivamente.

El resto de constituyentes pertenecen a la banda semidiurna, encabezadas por la M_2 . Entre otras constituyentes de esta banda se encuentran los satélites anuales de la M_2 , α_2 y β_2 en el anclaje A01 (Figura 20d). La semidiurna solar S_2 , a pesar de ser una de las más relevantes en el potencial de mareas, solo aparece en tercer lugar en la corriente total y en segundo lugar en la componente baroclínica en el anclaje A02 (Figura 20e). Y en el anclaje A03 (Figura 20f) aparece en cuarto lugar tanto en la corriente total, como en la componente baroclínica. Otras constituyentes semidiurnas poco relevantes son la K_2 , aparece como quinta en la componente barotrópica en el anclaje A02, N_2 que ocupa el quinto lugar en la corriente total y la componente barotrópica del anclaje A03 y en este mismo anclaje la NU_2 como quinta de la componente baroclínica.

Se determina que la M_2 es la constituyente más energética de la zona de estudio, ya que, a excepción de la componente barotrópica del anclaje A02 (Figura 20b) donde la más energética fue la K_1 y en tercera la M_2 , en el resto de corrientes de los tres anclajes la M_2 es persistentemente la más energética. En las series asociadas al anclaje A01 (microcats, ADCP (Figura 19b), profundidad de la isoterma de 9°C (Figura 19c) y corrientes (Figura 20d)) que presentan más de un año de datos, aparecieron las constituyentes α_2 y β_2 conocidas como satélites anuales de la M_2 . Estas constituyentes surgen en el potencial de mareas por perturbaciones del sol a la órbita de la luna. Sin embargo, su amplitud es muy pequeña y las variaciones que provocan en la M_2 son del orden de 0.04%. Por lo que su aparición en el AA de las corrientes y la temperatura debe de estar relacionado al forzamiento radiactivo del sol sobre otras variables como la estratificación que, a su vez, afecta a las corrientes baroclínicas (Müller *et al.*, 2014).

3.3.1. Constituyente K_1

La constituyente K_1 ocupa el segundo lugar en la lista de las ocho constituyentes con mayor amplitud del potencial de mareas (Gerkema, 2019) y también es la segunda más energética de la zona de estudio. En el AA de las series de temperatura más cercanas al fondo esta constituyente fue la más energética de los anclajes A01 y A02 (Figura 19b). Al comparar las amplitudes (Figura 21a) y fases (Figura 21b) de las series de temperatura del ADCP del anclaje A01 con el resto de los microcats, se observa que la constituyente tiene sus máximos en el fondo ya que los siete microcats más someros varían entre 0.02°C y 0.04°C , mientras que en el fondo se encuentra el máximo con 0.08°C . La amplitud de la profundidad de la isoterma de 9°C alcanza un desplazamiento de 3.8 m para esta constituyente y su fase está desfasada con respecto al microcat más cercano por 181° prácticamente medio periodo, característica de un océano estratificado. Con respecto a las fases en el fondo, el anclaje A02 presentó la menor fase seguido por el anclaje A01 y después, muy cercanamente, por el anclaje A03. Estas fases parecen indicar propagación hacia el sureste de ondas a esta frecuencia. Mientras que, en la vertical la fase disminuye con la profundidad en aproximadamente medio periodo.

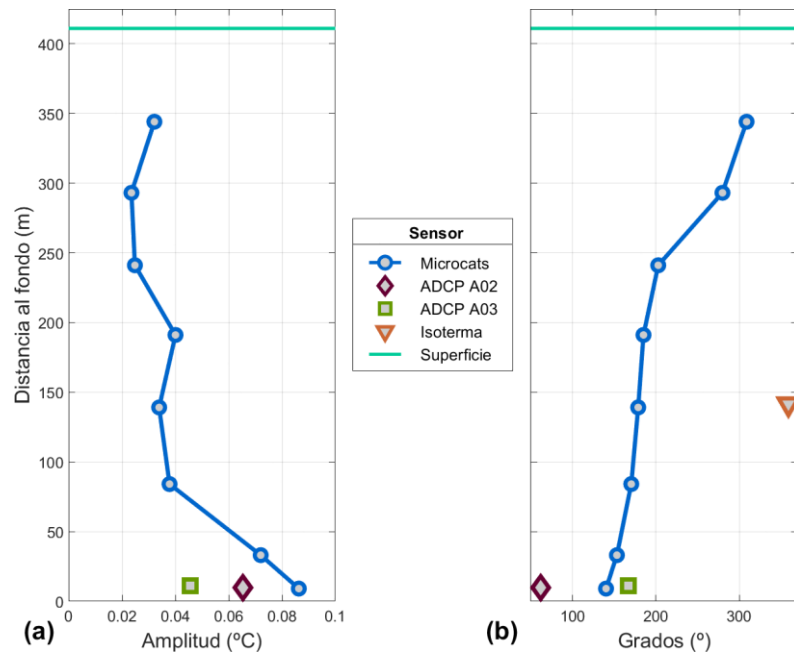


Figura 21. Resultados del AA de la temperatura, (a) amplitud y (b) fase para la constituyente K_1 . En (a) se observan las amplitudes obtenidas de los microcats y los ADCP's correspondientes a cada anclaje. Mientras que en (b), se agregó la fase de la profundidad de la isoterma de 9°C.

En la Figura 22 se muestra la estructura vertical de las corrientes mediante los parámetros de las elipses de marea para los tres anclajes. En el anclaje A01 (Figura 22a) se tienen los ejes mayores con las mayores amplitudes de los tres anclajes. Este anclaje cuenta con una señal baroclínica que desde los 250 m del fondo hasta la superficie es mayor que la corriente total y significativa en el resto de la columna de agua. La componente barotrópica del anclaje A01 es la menor de las tres corrientes, pero la mayor corriente barotrópica entre los tres anclajes y en comparación a las magnitudes de los ejes mayores, los errores de estos son pequeños (Tabla 4). El eje menor (Figura 22b) barotrópico es positivo, al igual que la mayoría de la corriente total. Los ejes menores de la corriente baroclínica son cercanos a cero, lo que indica que se trata de una corriente aproximadamente rectilínea. Sin embargo, los errores del eje menor son mayores que sus amplitudes. La inclinación de las elipses (Figura 22c) disminuye con la profundidad de manera constante, lo que indica una rotación de alrededor de 45° entre el fondo y la superficie para la corriente total y la componente baroclínica. Cerca del fondo las elipses se alinean con el eje del cañón, aproximadamente entre los 110 m y 120 m del fondo. Al igual que las fases de las series de los microcats, las fases de la corriente disminuyen con la profundidad (Figura 22d). La fase de la profundidad de la isoterma de 9°C está en fase con la de las corrientes.

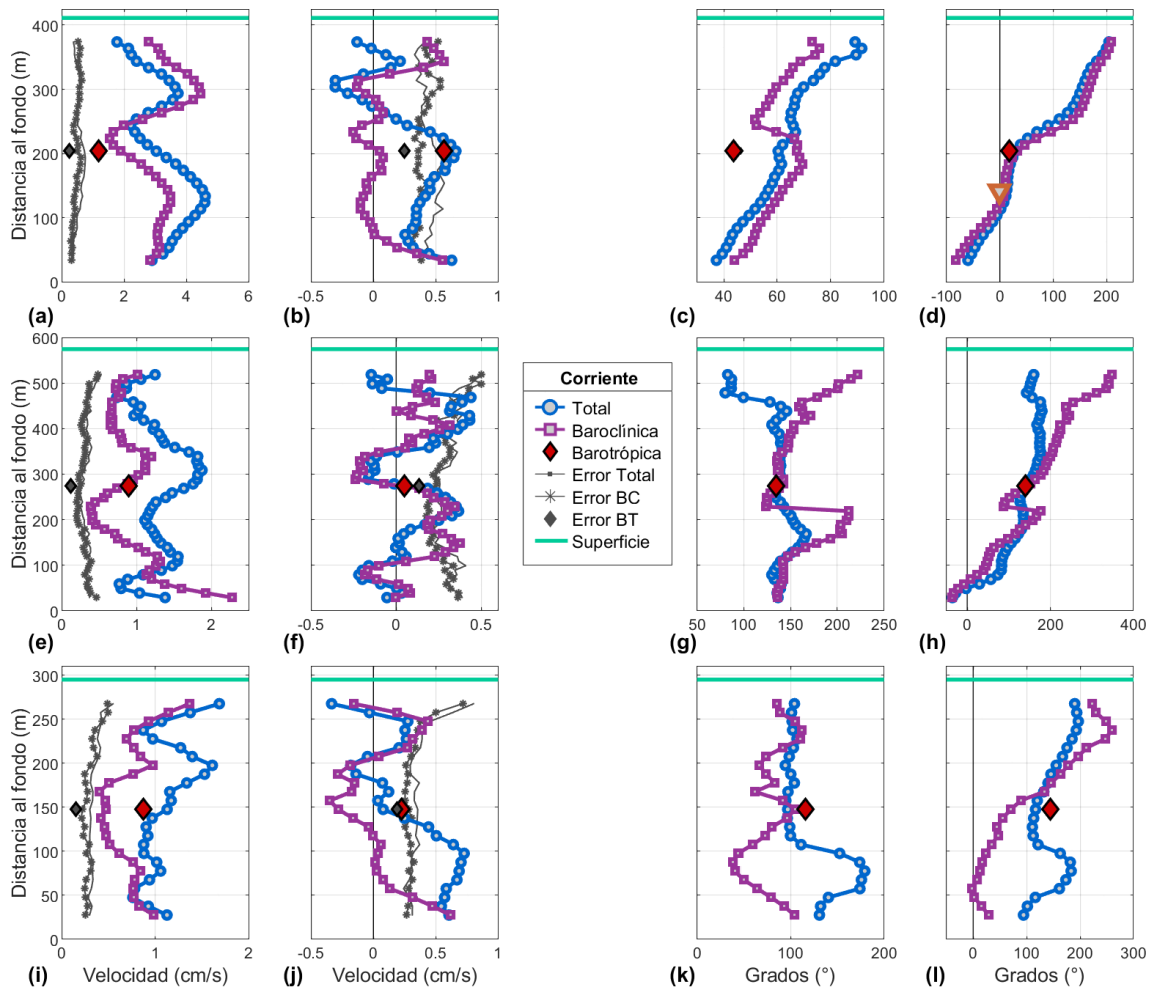


Figura 22. Parámetros de las elipses de marea obtenidos del AA de la corriente total y sus componentes barotrópica y baroclínica en los tres anclajes para la constituyente K_1 . (a) Eje mayor, (b) eje menor, ambos incluyen los errores correspondientes, (c) inclinación y (d) fase. para el anclaje A01. Paneles (e), (f), (g) y (h), igual que (a), (b), (c) y (d) para el anclaje A02. Paneles (i), (j), (k) y (l), igual (a), (b), (c) y (d) para el anclaje A03. BT y BC en la leyenda se refieren a barotrópicas y baroclínicas, respectivamente. El triángulo invertido es la fase de la isoterma de 9°C .

El anclaje A02 presenta corrientes más débiles de la constituyente K_1 comparadas al anclaje A01, pero igual que en este último, tiene una fuerte señal baroclínica. El eje mayor (Figura 22e) fue máximo cerca del fondo donde la componente baroclínica es alrededor de 1 cm/s mayor que la corriente total y ambas disminuyeron conforme disminuyó la profundidad. A diferencia del anclaje A01, el eje menor del anclaje A02 (Figura 22f) tiene diversos cruces por cero en la corriente total. Los perfiles del eje menor de las corrientes totales y baroclínicas están superpuestas en gran parte de la columna de agua. El eje menor de la componente barotrópica es cercana a cero, por lo que este anclaje también presenta una corriente casi rectilínea. La inclinación (Figura 22g) en la corriente total no varía significativamente en la vertical, a excepción de la superficie, mientras que la componente baroclínica sigue el mismo patrón, pero a los 200 m de del fondo ocurre un salto que también se refleja en la fase (Figura 22h). Al igual que en el anclaje

A01, las fases disminuyen con respecto a la profundidad con un cambio mayor (aproximadamente un periodo) entre fondo y superficie para las corrientes baroclínicas.

Por último, el anclaje A03, tiene magnitudes del eje mayor (Figura 22i) similares a las del anclaje A02. Sin embargo, una diferencia entre ambos anclajes es que el anclaje A03 tiene las máximas amplitudes del eje mayor cerca de la superficie. El eje menor (Figura 22j) es similar al anclaje A01 ya que tiene gran parte de sus vectores rotando positivamente incluyendo la componente barotrópica que es muy pequeña (Tabla 4), casi del valor de su error correspondiente. En los primeros 150 m del fondo, las inclinaciones (Figura 22k) de la corriente total y de la componente baroclínica varían alrededor de 60° en direcciones opuestas para después continuar relativamente constantes en la vertical. De los tres anclajes, es el que presenta una menor similitud entre las fases (Figura 22l) de la corriente total y la componente baroclínica, pero esta última también decrece con la profundidad como en el caso de las corrientes baroclínicas en los otros dos anclajes.

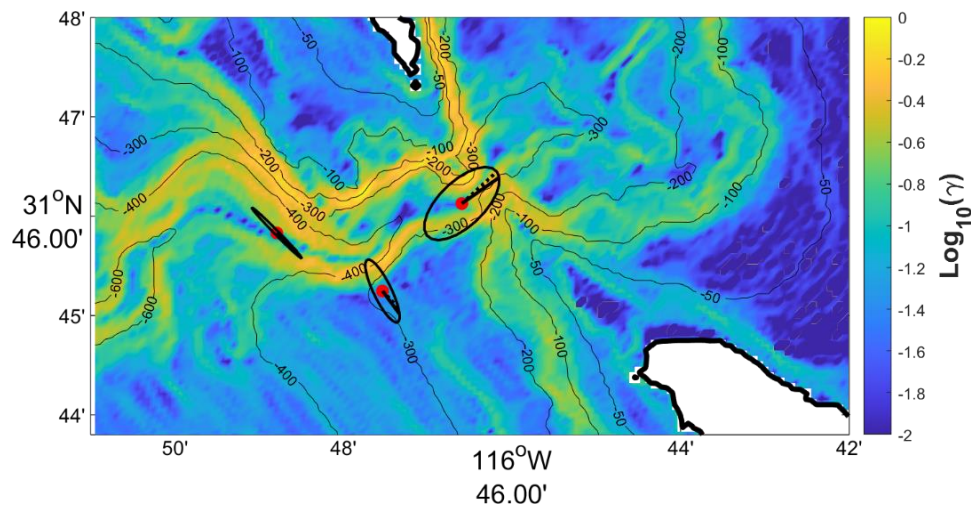


Figura 23. Mapa de elipses de marea de la componente barotrópica de cada anclaje para la constituyente K_1 . El color corresponde al logaritmo de la magnitud del gradiente de la batimetría. El color del eje en las elipses (negro) indica que las tres elipses rotan positivamente.

Para observar la variación de la componente barotrópica por anclaje, en la Figura 23 se graficaron las elipses de marea sobre un mapa que muestra la magnitud del gradiente de batimetría. Como se mostró en la Figura 22, las elipses en los anclajes A02 y A03 son prácticamente rectilíneas y aparentemente paralelas a las isóbatas en cada uno de los anclajes. Con respecto al anclaje A01, se tiene un cambio de dirección casi perpendicular al resto de los anclajes, con una inclinación de 43° , por lo que la corriente en general se alinea con el eje del cañón que tiene una inclinación aproximada de 52° con respecto al este. Las magnitudes de los ejes mayores (Tabla 4) no varían mucho entre sí, de hecho los anclajes A02 y A03

son prácticamente iguales mientras que por una diferencia de 0.3 cm/s el anclaje A01 es mayor. Los tres anclajes mostraron una señal baroclínica fuerte, en especial en el anclaje A01. Las corrientes tanto totales, baroclínicas y barotrópicas se intensifican en el cañón.

Tabla 4. Parámetros de las elipses de marea de las componentes barotrópicas de las corrientes de los tres anclajes para la constituyente K_1 .

	Eje mayor (cm/s)	Eje menor (cm/s)	Inclinación (°)	Fase (°)
A01	1.19±0.24	0.56±0.25	43.56	17.76
A02	0.89±0.12	0.05±0.13	134.68	140.39
A03	0.87±0.15	0.22±0.18	115.99	143.84

3.3.2. Constituyente M_2

Como se mencionó anteriormente, la constituyente M_2 es la más energética del área de estudio. Los AA de temperatura de las series de los microcats mostraron tener la máxima amplitud (Figura 24a) cerca de la superficie con 0.09°C la cual disminuye hasta 0.04°C a los 191 m del fondo, para volver a aumentar en el siguiente microcat más profundo. La amplitud de la profundidad de la isoterma de 9°C fue de 6.25 m, el doble de lo que presentó la constituyente K_1 . Se observa un desfase de casi 200° con respecto al microcat más cercano, consistente con el desfase de 180° que debe existir entre el movimiento vertical de las isotermas y las variaciones de temperatura en un océano estratificado. En el fondo se observa que las fases (Figura 24b) de los anclajes A02 y A03 varían poco entre ellas. La fase menor fue la del anclaje A02 seguida por el anclaje A03 con una diferencia de 10°, mientras que la diferencia con el anclaje A01 para ambos anclajes es mayor a los 200°. La fase de la temperatura en el anclaje A01 varía casi en un periodo completo en la vertical y las fases disminuyen monotónicamente con la profundidad, un comportamiento contrario al caso de las fases de la temperatura y corrientes baroclínicas de la constituyente K_1 .

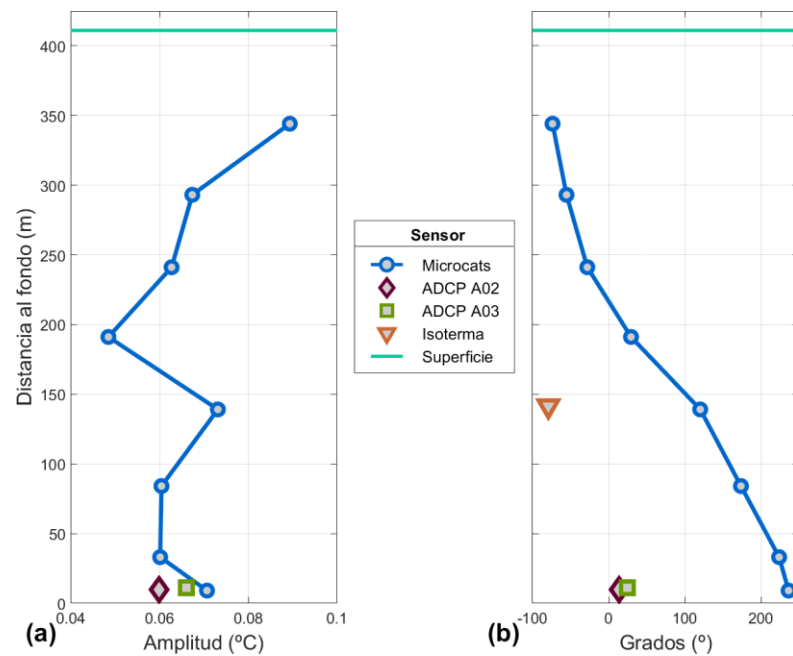


Figura 24. Al igual que en la Figura 21 pero para la constituyente M₂. Para esta figura se le restó 360° a la fase de la profundidad de la isoterma de 9°C.

La distribución vertical del eje mayor en el anclaje A01 (Figura 25a) presenta las mayores amplitudes de los tres anclajes. La corriente baroclínica es significativa, mayor que las corrientes totales en la superficie y fondo. La corriente total tiene su máximo mayor a 7 cm/s a 200 m del fondo. El eje menor (Figura 25b) en su mayoría es positivo, a excepción de la superficie y alrededor de 100 m por arriba del fondo, mientras que la componente barotrópica es pequeña, menor que su error correspondiente (Tabla 5). Las inclinaciones (Figura 25c) tanto de la corriente total como de la componente baroclínica disminuyen conforme aumenta la profundidad entre los 30° y 70°. Se alinean con la inclinación del cañón (~52°) entre los 110 m y 150 m. La componente barotrópica está casi alineada con el cañón con 57°. Las fases de las corrientes total y baroclínica (Figura 25d) están casi superpuestas ambas aumentando con la profundidad hasta unos 140 m por arriba del fondo. A partir de esa profundidad de la fase de la corriente total disminuye mientras que la de la baroclínica continúa aumentando. La fase de la profundidad de la isoterma de 9°C es alrededor de 87° mayor que la de las corrientes baroclínicas a la misma profundidad.

El segundo anclaje es el que presenta la señal baroclínica más fuerte relativa a las corrientes totales. Los ejes de las elipses de marea de la corriente barotrópica son muy pequeños (Tabla 5) y las corrientes totales y baroclínicas están casi superpuestas (Figura 25 e, f y g). En el eje mayor se observa una estructura vertical con dos máximos y tres mínimos (Figura 25e). A 128 m del fondo se encuentra el máximo con 3.6 cm/s, seguido por 3.4 cm/s a los 378 m. El eje menor es negativo en casi toda la columna de agua (Figura 25f). La inclinación de la componente baroclínica varía entre los 130° y los 188° (Figura

25g). Las fases de las elipses varían 366° (prácticamente un período) en la vertical con su mínimo en superficie y su máximo a los 68 m arriba del fondo (Figura 25h). Pero la fase disminuye hasta 140° en la celda más profunda a 28 m del fondo, lo cual puede ser un efecto de la fricción con el fondo. En casi toda la columna de agua entre la superficie y los 68 m del fondo.

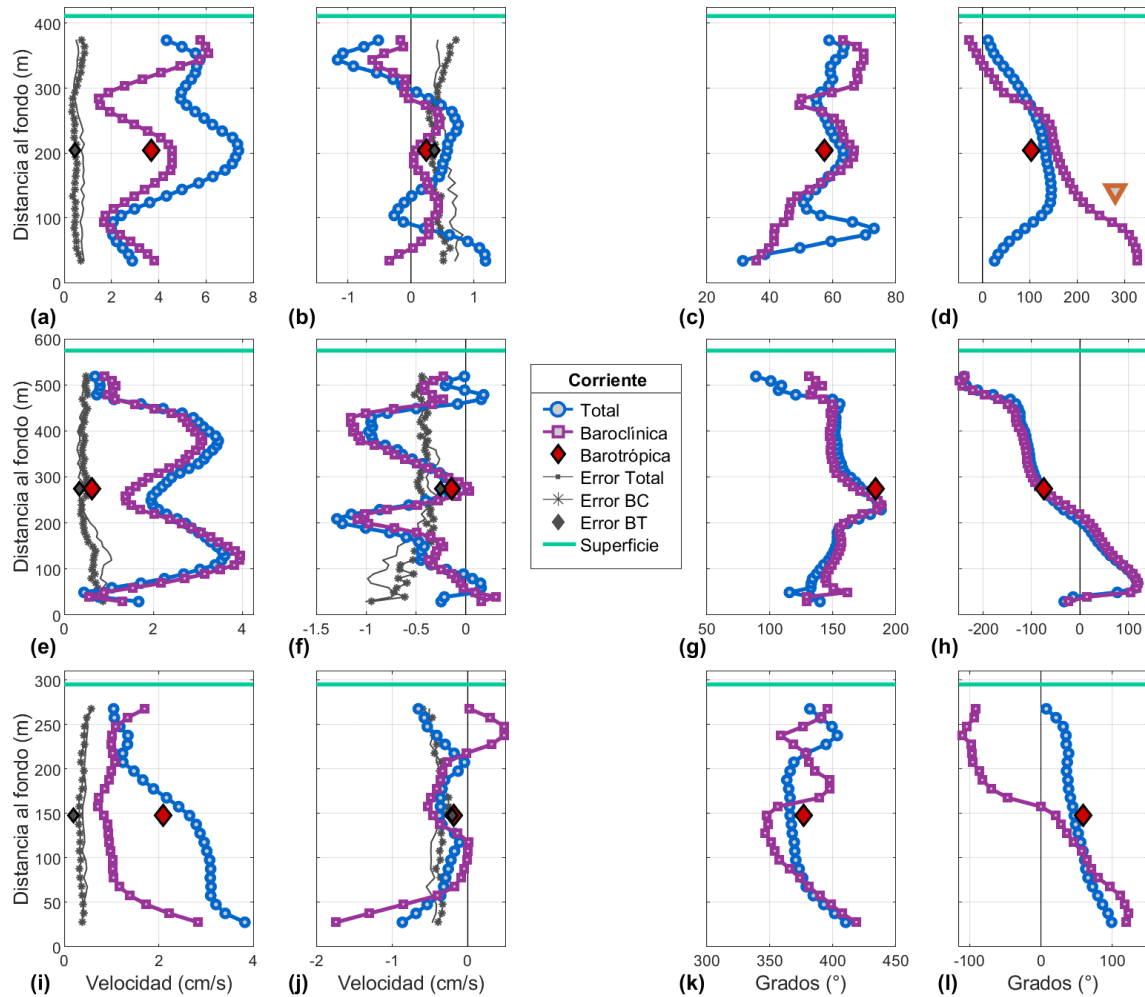


Figura 25. Igual que la Figura 22 pero para la constituyente M_2 .

El tercer anclaje es el que mostró la menor señal baroclínica de los tres, así como las menores magnitudes de eje mayor y menor. Con respecto al eje mayor (Figura 25i), se tienen los mínimos de la corriente total y componente baroclínica cerca de la superficie y ambas aumentan con la profundidad. La componente barotrópica es mayor a la componente baroclínica en casi toda la columna de agua, a excepción del fondo. El eje menor (Figura 25j) de la corriente total es negativo en toda la columna y menor a 1 cm/s. La componente baroclínica cerca de la superficie es positiva y cambia de signo a 217 m del fondo, presentando un máximo (en valor absoluto) de 1.7 cm/s cerca del fondo. La inclinación (Figura 25k) de

ambas corrientes varía alrededor de 50° en la vertical. Por último, ambas fases (Figura 25I) de la corriente total y baroclínica disminuyen conforme aumenta la profundidad. Pero la componente baroclínica varía alrededor de 200° en la vertical, mientras que la corriente total solo la mitad. Las fases de las corrientes baroclínicas de los tres anclajes y de la temperatura en el anclaje A01 disminuyen monótonicamente con la profundidad lo cual es consistente con propagación hacia arriba de la velocidad de grupo de las ondas internas de gravedad para la frecuencia M_2 .

Al realizar una comparación entre los parámetros de la elipse de marea de la componente barotrópica de los tres anclajes (Tabla 5) y, graficarlos en un mapa con la magnitud del gradiente de batimetría se obtuvo la Figura 26. Donde al igual que la constituyente K_1 se tiene una intensificación de la corriente en el cañón. Sin embargo, en esta constituyente esta intensificación es 6 veces mayor que el anclaje A02 y casi 2 veces mayor que el anclaje A03. En los tres anclajes se presentaron elipses angostas (corrientes casi rectilíneas) y con rotación negativa en los anclajes A02 y A03; y rotación positiva en el anclaje A01. Sin embargo, nótese que las magnitudes de los ejes menores son menores que los errores asociados.

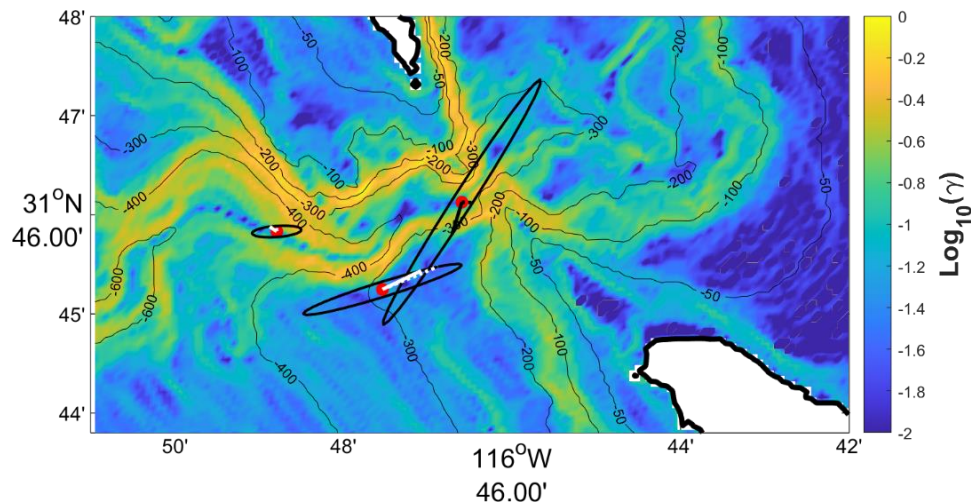


Figura 26. Igual que la Figura 23 pero para la constituyente M_2 .

Tabla 5. Parámetros de las elipses de marea de las componentes barotrópicas de las corrientes de los tres anclajes para la constituyente M_2 .

	Eje mayor (cm/s)	Eje menor (cm/s)	Inclinación ($^\circ$)	Fase ($^\circ$)
A01	3.67 ± 0.44	0.23 ± 0.37	57.26	102.84
A02	0.62 ± 0.34	-0.14 ± 0.25	4.17	105.73
A03	2.09 ± 0.19	-0.18 ± 0.21	17.21	59.23

3.3.3. Variación estacional de la M_2

A partir de la presencia de los satélites anuales de la M_2 entre las constituyentes más energéticas del anclaje A01, se compararon sus parámetros de las elipses de marea para observar sus magnitudes, similitudes y diferencias con la M_2 . Los satélites anuales α_2 y β_2 son menores en magnitud del eje mayor (Figura 27a) que la constituyente M_2 , solo cerca del fondo es mayor β_2 . Con respecto al eje menor (Figura 27b) se tienen magnitudes similares en la mayoría de la columna de agua, aunque M_2 es mayor en superficie con ejes negativos mientras que en el fondo con positivos. De los cuatro parámetros de la elipse de marea, la inclinación (Figura 27c) es el parámetro en que las tres constituyentes son más similares. Varían 60° en la vertical con el mínimo en el fondo y máximo cerca de la superficie. Entre los 123 m y 253 m del fondo las tres inclinaciones están superpuestas. En las fases (Figura 27d) las tres constituyentes comparten la misma estructura vertical, variando entre 200° en el caso de α_2 y β_2 , mientras que la M_2 solo varió 150° . Estas no se superponen.

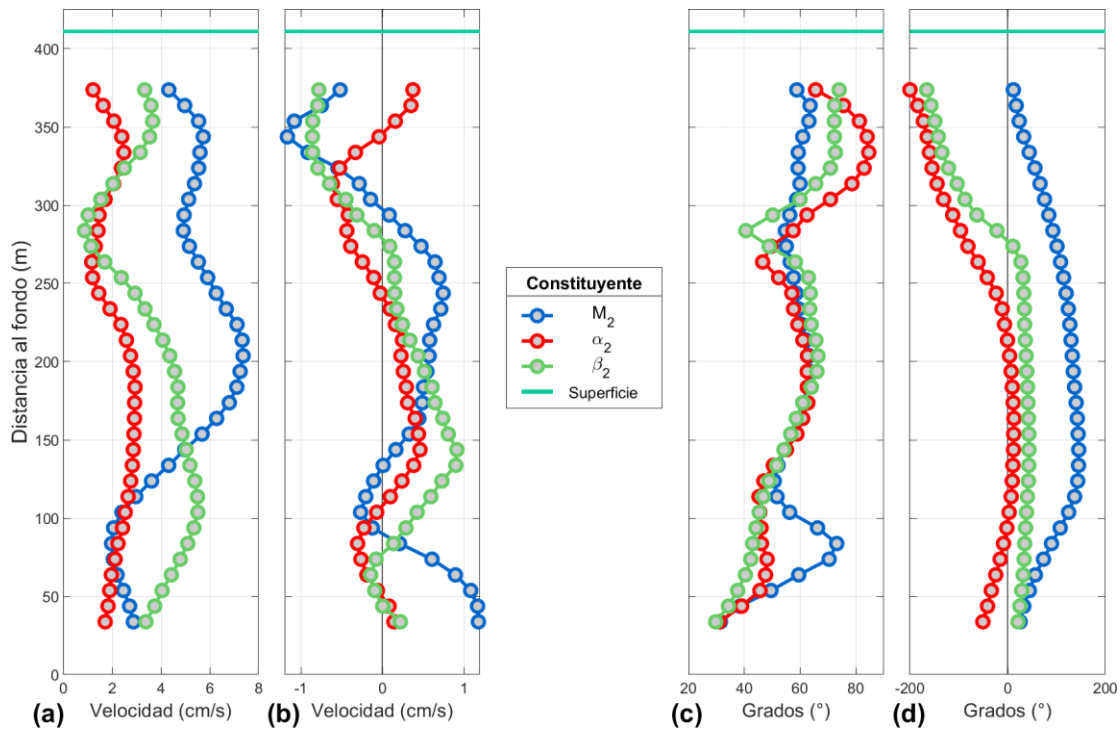


Figura 27. Parámetros de la elipse de marea de las constituyentes α_2 , β_2 y M_2 en el anclaje A01. (a) Eje mayor, (b) eje menor, (c) inclinación y (d) fase.

Para realizar el análisis estacional se extrajeron series de 90 días de las series completas. Como el anclaje del cañón (A01) contiene mayor número de estaciones, fue el enfoque principal para el análisis estacional. Este anclaje es el que tiene las series más largas, ya que los anclajes A02 y A03 solo contienen

tres estaciones cada uno. Las series correspondientes al anclaje A01 (temperatura, corrientes y profundidad de la isoterma de 9°C) contienen cinco estaciones que van desde verano de 2011 hasta verano de 2012.

En la Figura 28, se observa la variación estacional en la vertical de la amplitud (Figura 28a) y fase (Figura 28b) de las series de temperatura de los microcats en el anclaje A01. Se observa que la estructura vertical en las amplitudes varía con las estaciones. Los cambios más significativos en la vertical y valores máximos de amplitud se observan en primavera de 2012 y en otoño de 2011. El otoño presenta el máximo de todas las series en el fondo con 0.14°C de amplitud, mientras que su mínimo es a los 84 m del fondo, con 0.03°C. La primavera, por su parte, tiene su máximo a los 140 m con 0.13°C y disminuye gradualmente hasta los 293 m en su mínimo de 0.02°C. Los dos veranos analizados presentaron estructuras verticales similares. Ambos tienen su mínimo en el fondo y máximo en superficie. El verano de 2012 varió más en la vertical, con un mínimo de 0.01°C (la menor amplitud del análisis) y un máximo de 0.12°C, equiparándose a las estaciones con las amplitudes más grandes. El verano de 2011 presenta de manera similar su máximo en superficie, pero menor que el verano de 2012 con 0.10°C de amplitud. Su mínimo en el fondo fue de 0.02°C. Por último, la estación que presentó menor variación en la vertical fue el invierno de 2012. Su máxima amplitud de 0.10°C fue cerca de la superficie, que disminuye hasta los 191 m donde se encuentra su mínimo con 0.04°C.

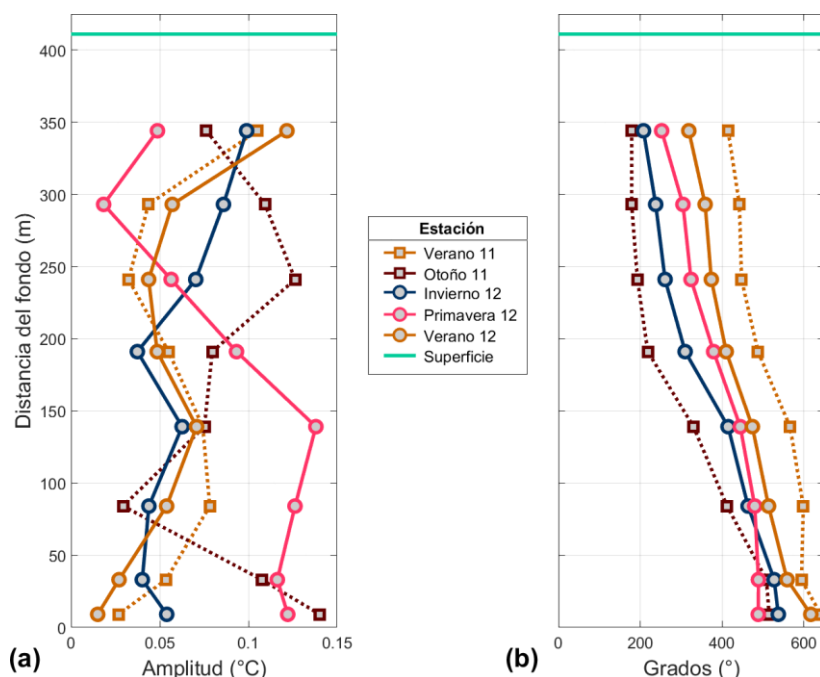


Figura 28. Amplitud (a) y fase (b) del AA a las series estacionales de temperatura de los ocho microcats instalados en el anclaje A01 para la constituyente M₂.

Los cambios en las amplitudes y su estructura vertical muestran un cambio estacional en la constituyente M_2 como también lo sugiere la presencia de sus satélites anuales α_2 y β_2 en las constituyentes más energéticas del AA. Las fases (Figura 28b) por su lado, mantienen la misma estructura vertical. La fase se incrementa hacia el fondo en todas las estaciones con cambios que van de 150° a 300° . Sin embargo, se tiene un desfase entre cada estación. Cerca de la superficie ningún perfil se cruza hasta los 84 m del fondo, donde la primavera de 2012 solo difiere 9° con los dos microcats más profundos que tienen la misma fase.

En el AA estacional de las corrientes se observan los cambios estacionales y la diferencia que presenta los ejes mayores y las fases de la corriente total (Figura 29a y b) comparada a estos mismos parámetros de la componente baroclínica (Figura 29c y d). Ambas corrientes comparten al otoño de 2011 como la estación con las mayores velocidades. Para la corriente total el máximo fue de 15 cm/s a los 190 m del fondo mientras que para la componente baroclínica fue de 12.4 cm/s cerca de la superficie a los 353 m del fondo. Las estaciones menos energéticas fueron la primavera y el invierno de 2012. Cerca de la superficie los ejes mayores de la corriente total casi no varían durante las estaciones, y están superpuestos los cinco perfiles entre los 300 m y 350 m del fondo. Las fases de la corriente total (Figura 29b) varían poco entre estaciones, pero resalta la primavera, que a diferencia de las demás fases estacionales no decrece conforme aumenta la profundidad. Por lo que se puede considerar que en primavera se tiene una fase que coincide más con la fase de las corrientes baroclínicas correspondientes. Por su lado, en la fase de la componente baroclínica (Figura 29d) el otoño es la estación que no sigue el patrón de las demás estaciones ya que disminuye en los 100 m más cercanos al fondo. Esta disminución de la fase podría estar ligada a efectos de disipación, ya que en otoño es donde se presentan las corrientes de marea semidiurnas más intensas (Figura 29a).

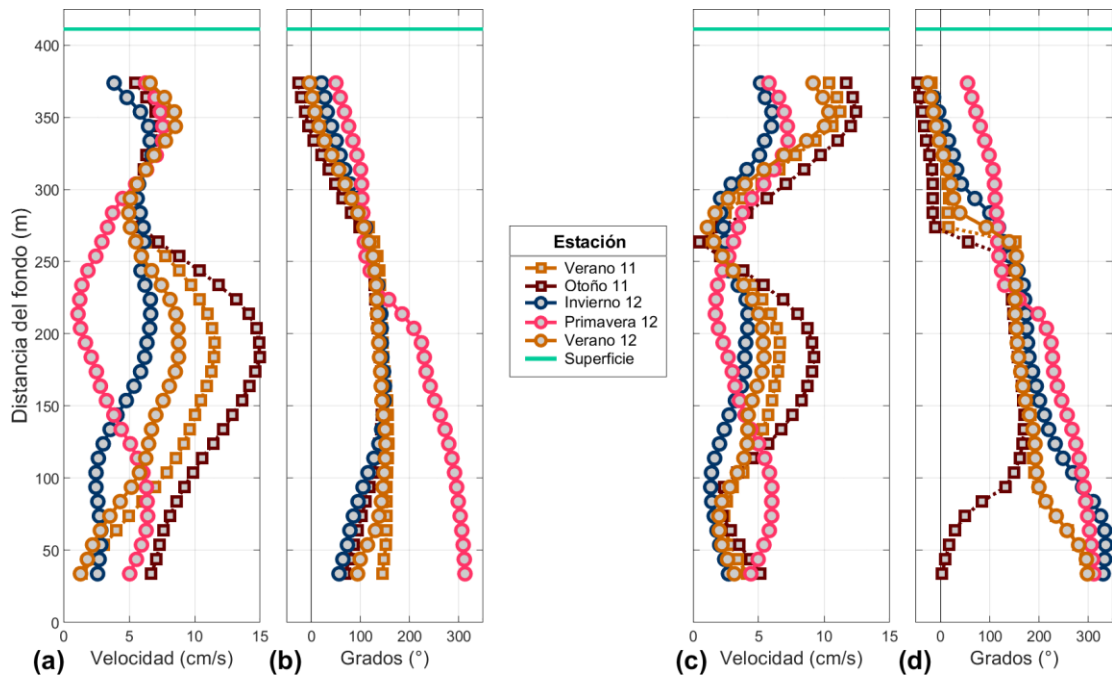


Figura 29. Variación estacional del eje mayor (a) y fase (b) de la constituyente M_2 de la corriente total. (c) y (d) igual que en (a) y (b) pero para las corrientes baroclínicas.

Capítulo 4. Discusión

4.1. Características generales de las corrientes

A causa de la ausencia de estudios previos en el cañón de Punta Banda se planteó como objetivo general, realizar un análisis de la zona enfocado en las características de las corrientes de marea. Se hizo una caracterización general de las frecuencias en las que se concentra más energía. Las frecuencias más energéticas se encontraron en periodos menores a 36 horas en las bandas diurna y semidiurna de marea (ver sección 3.2. Espectros). La concentración de energía a estas frecuencias se debe a la presencia de accidentes topográficos como montañas y cañones submarinos (Hotchkiss y Wunsch, 1982; Wunsch y Webb, 1979). Petruncio *et al.* (1998) describe a los cañones como trampas de ondas internas donde la energía se concentra. Existen ciertos cañones que debido a su geometría tienden a presentar más energía en ondas internas que en zonas adyacentes debido a la reflexión que puede darse en las paredes del cañón (Wunsch, 1975). En el cañón de Punta Banda se observó una intensificación en la marea barotrópica (ver Figura 23 y Figura 26) y baroclínica (ver Figura 22 y Figura 25) al comparar el anclaje del cañón con el profundo y el somero, por lo que es posible la reflexión, pero difícil de determinar por la complejidad de la batimetría.

Kunze *et al.* (2002) obtuvieron los mismos picos energéticos en las bandas diurna y semidiurna, con la constituyente semidiurna M_2 como la más energética en su análisis. En el presente trabajo se obtuvo el mismo resultado donde la M_2 fue la más energética seguida por la diurna K_1 . Ambas estuvieron presentes en todos los resultados de los AA tanto de las corrientes (ver Figura 20) como de la temperatura (ver Figura 19), motivo por el que se les realizó un análisis más profundo a cada una. Como resultado se observó que las corrientes de marea de M_2 y K_1 son significativamente baroclínicas en el anclaje del cañón (A01) y el somero (A03), y casi totalmente baroclínicas en el anclaje profundo (A02).

4.2. Variación estacional

Se encontró a las constituyentes α_2 y β_2 conocidas como satélites anuales de la M_2 dentro de las cinco constituyentes más energéticas en los AA correspondientes al anclaje del cañón (A01). Resultado que no se pudo obtener de los otros dos anclajes a causa de la longitud de sus series de tiempo. Se

comprobó que existe una variación estacional en las corrientes de marea de la M_2 (ver sección 3.3.3. Variación estacional). Sin embargo, el origen de una variación estacional a la marea baroclínica radica en dos posibles causas mencionadas por Müller *et al.* (2014): un cambio estacional de la estratificación o el efecto de la fricción entre la capa superficial del océano con el hielo marino. Al no aplicar la segunda causa a la zona de estudio, se buscó una variación estacional en la estratificación.

Tabla 6. Promedios climatológicos estacionales de N^2 . Calculados a partir de las campañas de CTD estacionales entre 2008 y 2012 (ver Tabla 3). Valores multiplicados por 10^5 .

	Primavera (rad/s^{-2})	Verano (rad/s^{-2})	Otoño (rad/s^{-2})	Invierno (rad/s^{-2})
A01	1.89	2.95	2.66	1.97
A02	1.59	2.43	2.22	1.68
A03	2.26	4.30	3.10	2.40

Para analizar la variación estacional de la estratificación, se calcularon promedios climatológicos estacionales de N^2 (Tabla 6) a partir de los datos disponibles de las campañas de CTD (ver Figura 4). El verano presenta los mayores valores de N^2 y la primavera los menores en los tres anclajes. El anclaje somero (A03) es el que presenta mayor estratificación en las cuatro estaciones, aunque no hay mucha diferencia entre los anclajes, ya que están entre 2 y 3 km de distancia (ver Tabla 1). Se seleccionaron lances que se encontraron dentro del periodo de los anclajes para compararlos con la estratificación estimada a partir de los microcats los cuales proporcionan una buena cobertura temporal por debajo de los 64 m (ver Tabla 2). En la Figura 30 se observa que en la estratificación calculada a partir de los microcats el otoño presenta la mayor estratificación. Pero en general, hay poca variación de la estratificación por debajo de los 64 m. A partir de los datos de CTD se ve que el verano es la estación con mayor estratificación. Sin embargo, solo se tuvo un lance por estación así que esos valores posiblemente no son muy representativos. Para obtener una idea de la estratificación en la capa superficial que no muestrearon los microcats, se calculó N^2 promedio por arriba de los 64 m a partir de los datos de CTD y se puede ver que con un solo lance el verano tiene mayor estratificación en la capa superficial (ver Tabla 3). A partir de los microcats se observa una variación en la estratificación promedio por debajo de los 64 m de ~40% entre otoño y primavera.

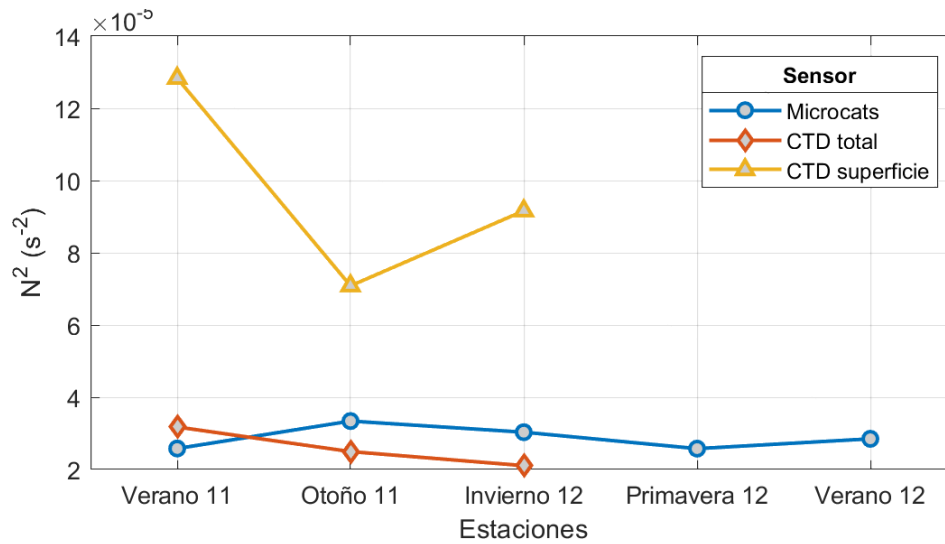


Figura 30. Variación estacional del promedio vertical de N^2 estimada en el anclaje A01. Se muestran los promedios verticales y estacionales de N^2 calculada a partir de los datos de CTD en toda la columna de agua; utilizando nada más los datos cerca de la superficie (menores a 65 m de profundidad); y utilizando los datos de los microcats que no cubren los primeros 65 m de la columna de agua.

4.3. Propagación vertical

Las fases de las corrientes baroclínicas y de la temperatura de la M_2 en los tres anclajes aumentan hacia el fondo con una variación que es alrededor de un periodo de la marea (ver Figura 24 y Figura 25). De la teoría de ondas internas se sabe que, una propagación de la fase hacia el fondo implica una velocidad de grupo con dirección hacia la superficie congruente con una generación de las ondas internas en el fondo, lo cual es una característica de las mareas baroclínicas. A realizar ajustes lineales por mínimos cuadrados a las fases del AA del periodo común entre los tres anclajes de las corrientes baroclínicas y la temperatura de los microcats (Figura 31) se pudo estimar una velocidad de propagación y una longitud de onda verticales empíricas.

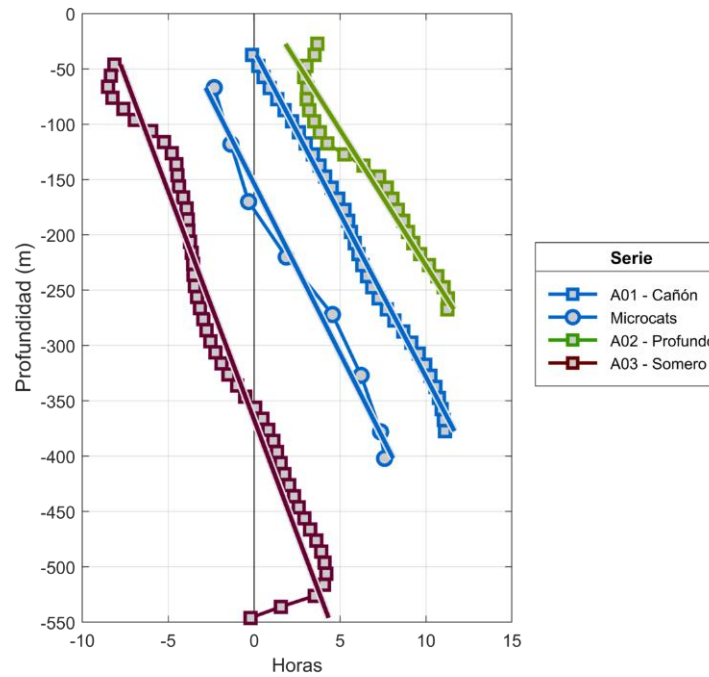


Figura 31. Ajustes lineales superpuestos a los perfiles de fase de las corrientes baroclínicas y de la temperatura medida por los microcats en el anclaje del cañón (A01). Las fases de cada anclaje se obtuvieron a partir de AA al periodo común entre los tres anclajes (4/11/2011 al 29/07/2012).

Los ajustes lineales (Figura 31) a las fases de las corrientes baroclínicas en los tres anclajes y la temperatura del anclaje A01 son bastante buenos. Con el ajuste lineal se estimó empíricamente la rapidez de fase en la vertical para cada perfil y las correspondientes longitudes de onda verticales (Tabla 7). Algo relevante en los resultados fue que se obtienen velocidades de fase muy similares en el anclaje A01 utilizando dos conjuntos de datos distintos. En la Tabla 7 también se muestran los correspondientes valores teóricos calculados a partir de modos normales para una estratificación constante. La componente vertical del vector número de onda (m_n), y por tanto la rapidez de fase (C_v) y la longitud de onda verticales (λ), solo dependen de la profundidad y están dados por:

$$C_v = \frac{\omega}{m_n} = \frac{\omega H}{n\pi} \qquad \lambda_v = \frac{2\pi}{m_n} = \frac{2H}{n}$$

donde ω es la frecuencia de la onda, que en este caso es la frecuencia de la M_2 , H es la profundidad y n el número de modo. Al comparar los resultados obtenidos con los teóricos calculados a partir de modos normales, tenemos una buena aproximación a los parámetros de propagación vertical del modo 2.

Tabla 7. Rapidez de fase vertical y longitud de onda vertical estimada a partir de las regresiones lineales y las calculadas a partir de la teoría de modos normales.

Serie	Profundidad (m)	C_v (m/s)	λ_v (m)	C_v (m/s) modo 2	λ_v (m) modo 2
A01 – Cañón	411	8.2×10^{-3}	366	9.2×10^{-3}	411
Microcats		8.5×10^{-3}	381		
A02 – Profundo	574	1.1×10^{-2}	513	1.2×10^{-2}	574
A03 – Somero	295	6.8×10^{-3}	304	6.5×10^{-3}	295

A partir de la disponibilidad de datos en el anclaje del cañón se pueden comparar los ajustes a las fases del AA de la componente baroclínica y temperatura con la profundidad de la isoterma de 9°C. Para oscilaciones en un océano estratificado, la temperatura y el desplazamiento de las isotermas están desfasadas 180°; y eso se observa tanto para la K_1 (ver Figura 21) como para la M_2 (ver Figura 24). Para una onda interna de gravedad plana, la velocidad horizontal en la dirección de propagación de la onda y el desplazamiento de las isotermas están desfasados 90°. Para una propagación de la fase hacia abajo, la temperatura antecede en 90° a la velocidad horizontal, y esta antecede al desplazamiento de la isopícnas en 90° (Gill, 1982). En el anclaje A01, a la profundidad promedio de la isoterma de 9°C en periodo común con las series de temperatura y ajustes a la corriente baroclínica; la temperatura antecede en 123° a la velocidad a lo largo del eje mayor; y a su vez, esta antecede al desplazamiento de la isoterma de 9°C por 67°. Al comparar la temperatura y la velocidad cerca de superficie y fondo, se obtienen 113° y 127°. Los desfases están cercanos a 90° dadas las incertidumbres en las fases y en la profundidad promedio de la isoterma de 9°C.

4.4. Propagación horizontal

Las fases del AA de las corrientes baroclínicas de la constituyente M_2 aumentan aproximadamente de manera lineal (Figura 31). Por lo tanto, para determinar una propagación en la horizontal se tomó como una estimación general de la fase al promedio vertical de la fase en cada anclaje. Además, se tienen las fases del AA de las temperaturas cerca del fondo en los tres anclajes. Con estas fases, se calcularon diferencias de fase que, junto con las distancias entre los anclajes, se utilizaron para estimar una rapidez y dirección de propagación horizontal de una onda plana. Mediante un método empírico que consiste en

hacer un ajuste de mínimos cuadrados a la rapidez y dirección de propagación (2 incógnitas) con base a los desfases y distancias entre los tres anclajes (3 ecuaciones). El método se explica en detalle en el apéndice. Las diferencias de fase para el periodo común entre los tres anclajes se muestran en la Tabla 8, tanto para el promedio vertical de la fase de las corrientes baroclínicas, como para las fases de las temperaturas cerca del fondo. Las características de propagación horizontal (rapidez y dirección de propagación) para una onda plana (crestas rectas y paralelas) se plantean como dos escenarios cada uno correspondiente a cada conjunto de desfases de la Tabla 8 y se muestran en la Figura 32. Con la rapidez de fase y la frecuencia, también se puede calcular la longitud de onda horizontal que también se incluye en la Tabla 9 junto con la rapidez de fase y la dirección de propagación.

Tabla 8. Diferencias de fases correspondientes a dos escenarios de propagación horizontal para la constituyente M_2 .

Escenario	A02-A01	A03-A01	A03-A02
Corrientes baroclínicas (promedio vertical)	-220.8°	-156.1°	64.7°
Temperatura cerca del fondo (series de ADCP's)	-224.8°	-214.1°	10.7°

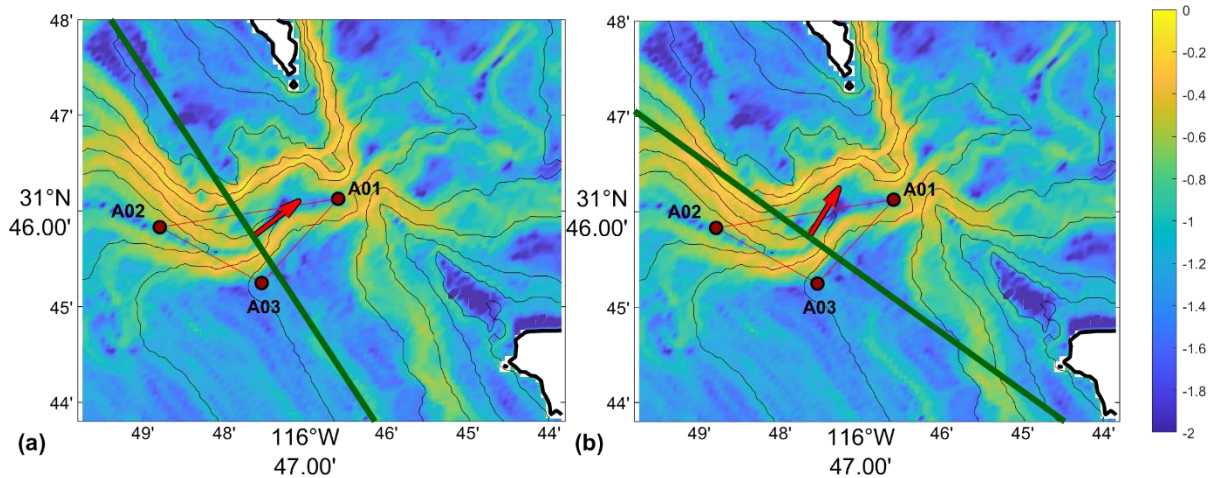


Figura 32. Cresta y dirección de propagación de las posibles ondas en un escenario de propagación para la constituyente M_2 . (a) Escenario a partir de los desfases entre los promedios verticales de fase de las corrientes baroclínicas. (b) Escenario con los desfases entre los anclajes a partir de la temperatura medida por los ADCP's. En color se muestra el logaritmo base 10 de la magnitud del gradiente de batimetría (γ).

Los resultados de la rapidez de fase, el ángulo de propagación y por consiguiente la longitud de onda horizontal (Tabla 9) son un poco diferentes entre los dos escenarios con una diferencia de unos 20° en la dirección de propagación y de 3 cm/s en la rapidez de propagación. Ambos resultados indican una

fuelle de generación de ondas fuera de la bahía, provenientes del suroeste. Dirección en la que se encuentra el valle marino de la Soledad que alcanza los 800 m de profundidad y, continuando al suroeste, se encuentra un bajo que alcanza profundidades mínimas de 100 m para luego continuar al talud continental con profundidades de 1000 m (ver Figura 1).

Tabla 9. Rapidez de fase, ángulo de inclinación del frente de onda con respecto al este y longitud de onda estimados empíricamente para la constituyente M_2 . Para la rapidez de fase y longitud de onda también se dan lo valores correspondientes más cercanos correspondientes a los modos 7 y 10.

Serie	C_h (m/s)	θ	λ_h (km)
AA	0.11	37.7°	5
ADCP	0.08	58.5°	3.63
Modo			
7	0.11	--	5.17
10	0.08	--	3.6

Al comparar las características de propagación vertical y horizontal con las correspondientes escalas para los modos normales de un fondo plano y estratificación constante (Tabla 7 y Tabla 9), resaltan las diferencias de escalas entre los modos 2 (propagación vertical) y los modos 7 y 10 (propagación horizontal). Aquí es necesario resaltar que los resultados de la propagación vertical se consideran más robustos ya que la estructura vertical de las fases en todos los casos dio un aumento aproximadamente lineal con la profundidad, y el aumento de fase hacia el fondo es congruente con una generación de las ondas en el fondo. Más aún, la rapidez de fase vertical en el anclaje A01 dio casi los mismos valores a partir de dos conjuntos de datos distintos (corrientes y temperatura); y en todos los anclajes fue consistente una rapidez de fase muy cercana al modo 2 y una longitud de onda similar a la profundidad local en cada anclaje. Por lo tanto, es muy posible que la estimación de los desfases horizontales con base en el promedio vertical de las fases en cada anclaje no sea el más adecuado. Para una onda interna plana la propagación de las crestas es tanto horizontal como vertical. En teoría, profundidades distintas de dos anclajes podrían estar en fase. En la realidad existen fronteras en el océano; y la profundidad y la estratificación no son constantes, lo cual complica bastante la descripción de la propagación de las ondas. Es importante mencionar que el escenario de propagación horizontal presentado anteriormente no es el único posible, ya que las fases e inclinaciones de las elipses de marea pueden sumárseles y/o restárseles 180° y describen a la misma elipse. Se escogió presentar ese escenario porque se obtiene un escenario similar en cuanto a dirección de propagación, a partir de dos conjuntos de datos distintos (temperatura y

corrientes). Además, la dirección de propagación coincide con una posible zona de generación en el bajo enfrente de Punta Banda y sería congruente con la amplificación de las corrientes baroclínicas observada en el anclaje del cañón.

Se empleó el mismo método para obtener una idea de la dirección de la que proviene la señal de la constituyente K_1 . De igual manera, se comparan dos escenarios a partir del AA a las corrientes baroclínicas y temperatura. Lo que permitió que aparentemente los resultados de frente de onda sean más similares entre escenarios (Figura 33). El método nos permite conocer de manera práctica de donde podría provenir la señal de la energía en la frecuencia K_1 . Se obtuvo que la energía contenida en esta constituyente proviene aparentemente del noroeste (Figura 33). Ambos escenarios tienen casi el mismo ángulo de propagación con una diferencia de apenas 5° . En cambio, la rapidez de fase del escenario del AA de la temperatura es casi el doble que el del AA de las corrientes baroclínicas (Tabla 10). Las velocidades de propagación de la señal son bastante bajas y esto podría estar relacionado a errores en la estimación de la fase de la propagación horizontal en base al promedio vertical de la fase el AA, tal y como se discutió.

Tabla 10. Diferencias de fases correspondientes a cada escenario de propagación horizontal para la constituyente K_1 .

Escenario	A02-A01	A03-A01	A03-A02
Corrientes baroclínicas (promedio vertical)	-170°	24.9°	194.9°
Temperatura cerca del fondo (series de ADCP's)	-79.9°	24.9°	104.8°

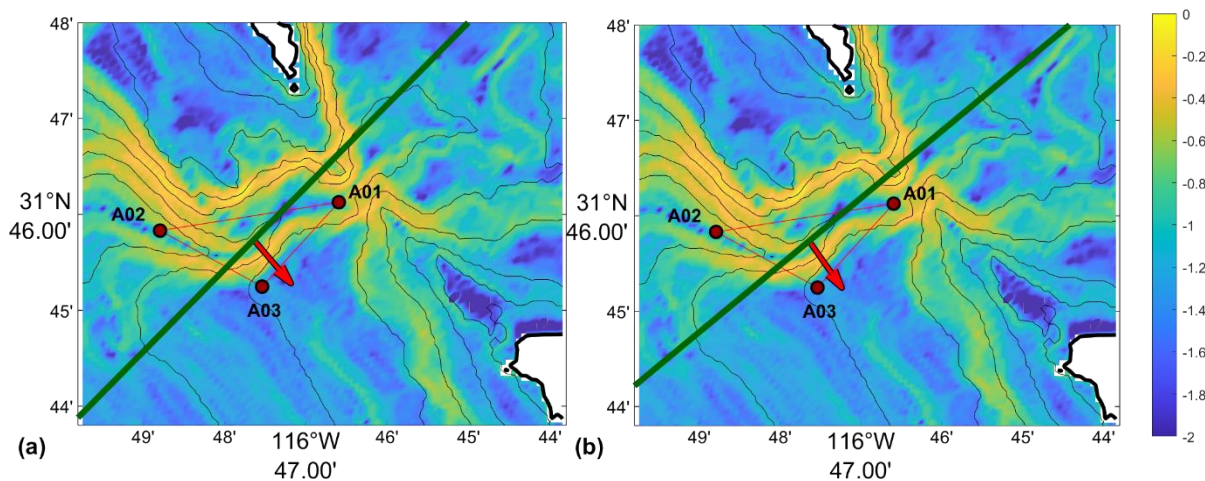


Figura 33. Igual que la Figura 32, pero para la constituyente K_1 .

Tabla 11. Rapidez de fase, ángulo de inclinación del frente de onda con respecto al este y longitud de onda estimados empíricamente para la constituyente K_1 .

Fases	C_h (m/s)	θ	λ_h (km)
AA	0.08	-49.32°	5
ADCP	0.15	-54.88°	3.63

La frecuencia de K_1 tiene la particularidad de ser una frecuencia subinercial en latitudes mayores a los 30° , por lo que la energía identificada en el AA en esta constituyente no puede ser descrita con la teoría tradicional de ondas internas. Gerkema y Shrira (2005) extendieron la teoría al descubrir la posibilidad de que ondas internas puedan tener frecuencias poco menores a la inercial y poco mayores a N^2 cuando se incluye el efecto β y los términos de Coriolis proporcionales a la componente horizontal del vector de rotación de la tierra. Sin embargo, para valores típicos de N^2 en la zona de estudio, el rango subinercial es muy pequeño y no alcanza el valor subinercial de aproximadamente 5% menor que f para la frecuencia K_1 . Las ondas subinerciales asociadas a las mareas diurnas al norte (o sur en el hemisferio sur) de la latitud crítica (latitud a la que la frecuencia diurna se hace igual a $|f|$) son ondas que decaen horizontalmente a partir de los accidentes topográficos donde se generan (v.gr., Brink, 1990; Musgrave *et al.*, 2016).

Capítulo 5. Conclusiones

A partir de los resultados del análisis se obtuvieron las características generales de las corrientes de marea en la zona del cañón de Punta Banda. Se concluye que las corrientes de marea en la zona son fundamentalmente baroclínicas y las constituyentes que dominan son: la semidiurna M_2 , seguida por la diurna K_1 . Los anclajes del cañón (A01) y somero (A03) son significativamente baroclínicos mientras que el anclaje profundo (A02) es casi totalmente baroclínico. Se observó una intensificación de las corrientes de marea en el cañón, tanto para M_2 como K_1 .

Se detectó una variación estacional de la M_2 mediante la presencia de las constituyentes α_2 y β_2 conocidas como los satélites anuales de la M_2 . Esta observación solo pudo ser posible gracias a que las series de tiempo del anclaje del cañón son mayores a un año, por lo que probablemente si se tuvieran series más extensas de los otros dos anclajes también aparecerían estas constituyentes. Se descartó que la presencia de los satélites anuales obtenidos por el AA sea el efecto astronómico de estas constituyentes ya la amplitud que poseen en el potencial de mareas es muy pequeña. Por lo que, la otra posibilidad de su aparición en las constituyentes más energéticas de la zona es por una variación estacional de las corrientes de marea. Al dividir las series del anclaje A01 en periodos estacionales se pudo observar que, efectivamente, existe una variación estacional en la M_2 . Las amplitudes estacionales de la componente baroclínica son similares a las de la corriente total. El otoño es la estación más energética, mientras que la menor es primavera. Para las corrientes baroclínicas, la energía durante el invierno es un poco menor que en primavera. La fuente principal de variación estacional de las corrientes baroclínicas es la variación estacional de la estratificación (Gerkema *et al.*, 2004).

Las fases de la temperatura en el anclaje del cañón y la componente baroclínica de la corriente de la M_2 en los tres anclajes aumentan monotónicamente hacia el fondo. Lo que indica propagación vertical de la fase hacia el fondo y propagación de la energía hacia superficie, consistente con generación de la marea baroclínica en el fondo. Mediante un ajuste lineal se pudo determinar empíricamente la rapidez de fase y la longitud de onda verticales. Los resultados a partir de las fases de la temperatura y las corrientes baroclínicas del anclaje del cañón fueron muy similares, lo cual hace más confiable la estimación ya que se trata de dos conjuntos de datos distintos. Utilizando modos normales con una estratificación constante se encontró que sería el segundo modo con una longitud de onda vertical igual a la profundidad el que más se asemeja a los parámetros de propagación vertical estimados empíricamente.

Mediante un ajuste por mínimos cuadrados a las estimaciones de la fase horizontal en los tres anclajes, se obtuvo un escenario de propagación en el que las ondas con la frecuencia M_2 se propagan hacia el noreste a través del arreglo de anclajes. Esta dirección de propagación es congruente con una generación en el bajo que se encuentra enfrente de Punta Banda. Sin embargo, las velocidades de propagación horizontal que se obtienen son muy bajas y coherentes con las escalas de modos normales altos (del 7 al 10). Es posible que esto se deba a una estimación errónea de la fase horizontal de las corrientes en base a un promedio vertical de las fases del análisis armónico.

Literatura citada

- Brink, K. H. 1990. On the generation of seamount-trapped waves. *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers*, 37(10), 1569-1582. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90062-Z](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90062-Z)
- Filonov, A., Lavín, M. F., Ladah, L. B., y Tereshchenko, I. 2014. Spatial variability of internal waves in an open bay with a narrow steep shelf in the Pacific off NW Mexico. *Continental Shelf Research*, 78, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.015>
- Garrett, C., y Munk, W. 1975. Space-Time Scales of Internal Waves: A Progress Report. *Journal of Geophysical Research*, 80(3), 291-297. <https://doi.org/10.1029/JC080i003p00291>
- Garrett, C., y Munk, W. H. 1979. Internal waves in the ocean. *Reviews of Geophysics*, 11(0), 339-369. <https://doi.org/10.1029/RG013i003p00591>
- Gerkema, T. 2019. *An Introduction to Tides*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316998793>
- Gerkema, T., Lam, F. P. A., y Maas, L. R. M. 2004. Internal tides in the Bay of Biscay: Conversion rates and seasonal effects. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(25-26 SPEC. ISS.), 2995-3008. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.09.012>
- Gerkema, T., y Shrira, V. I. 2005. Near-inertial waves in the ocean: Beyond the «traditional approximation». *Journal of Fluid Mechanics*, 529, 195-219. <https://doi.org/10.1017/S0022112005003411>
- Gill, A. E. 1982. Atmosphere - ocean dynamics. En *New York, U.S.a., Academic Press Inc., 1982: Vol. 30) (ISBN*. [https://doi.org/10.1016/0141-1187\(83\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0141-1187(83)90039-1)
- Gordon, R. L., y Marshall, N. F. 1976. Submarine Canyons: Internal wave traps? *Geophysical Research Letters*, 3(10), 622-624.
- Hotchkiss, F. S., y Wunsch, C. 1982. Internal waves in Hudson Canyon with possible geological implications. *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers*, 29(4), 415-442. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(82\)90068-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(82)90068-1)
- Kunze, E. 1985. Near-Inertial Wave Propagation in Geostrophic Shear. *Journal of Physical Oceanography*, 15, 544-565.
- Kunze, E., Rosenfeld, L. K., Carter, G. S., y Gregg, M. C. 2002. Internal waves in Monterey Submarine Canyon. *Journal of Physical Oceanography*, 32(6), 1890-1913. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<1890:IWIMSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<1890:IWIMSC>2.0.CO;2)

- Mateos, E., y Marinone, S. G. 2017. Variabilidad de corrientes por propagación de ondas en bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 43(3), 191-201. <https://doi.org/10.7773/cm.v43i3.2775>
- Müller, M., Cherniawsky, J. Y., Foreman, M. G. G., y Von Storch, J. S. 2014. Seasonal variation of the M 2 tide. *Ocean Dynamics*, 64(2), 159-177. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0679-0>
- Musgrave, R. C., Pinkel, R., MacKinnon, J. A., Mazloff, M. R., y Young, W. R. 2016. Stratified tidal flow over a tall ridge above and below the turning latitude. *Journal of Fluid Mechanics*, 793, 933-957. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.150>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TDE. *Computers and Geosciences*, 28(8), 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Petruncio, E. T., Rosenfeld, L. K., y Paduan, J. D. 1998. Observations of the internal tide in Monterey Canyon. *Journal of Physical Oceanography*, 28(10), 1873-1903. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1873:OOTITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1873:OOTITI>2.0.CO;2)
- Ramos-Musalem, K., y Allen, S. E. 2019. The impact of locally enhanced vertical diffusivity on the cross-shelf transport of tracers induced by a submarine canyon. *Journal of Physical Oceanography*, 49(2), 561-584. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0174.1>
- Wunsch, C. 1967. The Long-Period Tides. *Reviews of Geophysics*, 5(4), 447-475.
- Wunsch, C. 1975. Internal tides in the ocean. *Reviews of Geophysics*, 13(1).
- Wunsch, C., y Webb, S. 1979. The Climatology of Deep Ocean Internal Waves. En *Journal of Physical Oceanography* (Vol. 9, Número 2, pp. 235-243). [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1979\)009<0235:tcodoi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1979)009<0235:tcodoi>2.0.co;2)

Apéndice

Estimación de rapidez de fase y dirección de propagación con base a diferencias de fase entre tres puntos.

En la Figura 34 se muestra una onda plana (crestas paralelas) propagándose en una dirección desconocida (θ) y a una rapidez de fase (c) también desconocida. La onda pasa a través de tres puntos de medición (puntos rojos).

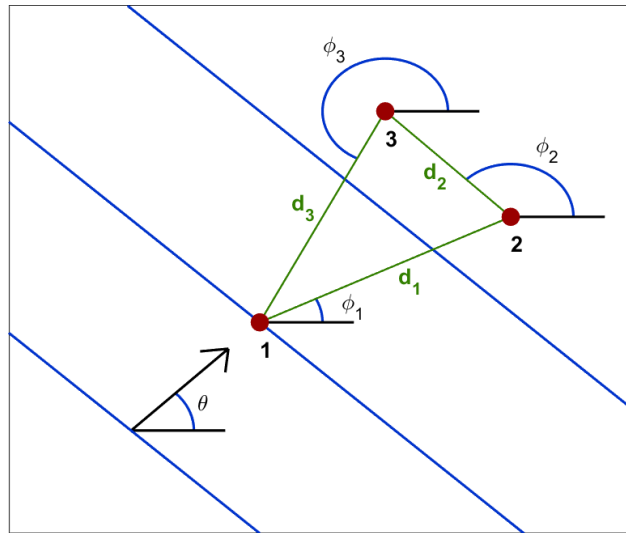


Figura 34. Diagrama representativo de crestas de ondas propagándose en la dirección θ con respecto a la horizontal y pasando sobre tres puntos (1, 2, 3). La distancia entre los puntos 1 y 2 es d_1 ; entre el 2 y el 3 es d_2 y entre el 3 y el 1 es d_3 . Los ángulos de la horizontal con respecto a los segmentos que unen los puntos son ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 , respectivamente.

Las proyecciones (D_1 , D_2 y D_3) de las distancias d_1 , d_2 y d_3 sobre la perpendicular a las crestas están dadas por:

$$D_1 = d_1(\cos \phi_1 \cos \theta + \sin \phi_1 \sin \theta)$$

$$D_2 = d_2(\cos \phi_2 \cos \theta + \sin \phi_2 \sin \theta)$$

$$D_3 = d_3(\cos \phi_3 \cos \theta + \sin \phi_3 \sin \theta)$$

A partir de las fases proporcionadas por el AA se conoce el tiempo que tarda una onda en llegar del punto 1 al punto 2 (Δt_1); del 2 al 3 (Δt_2) y del 1 al 3 (Δt_3). Entonces las distancias D_1 , D_2 y D_3 están dadas por:

$$D_1 = c\Delta t_1 ; D_2 = c\Delta t_2 ; D_3 = c\Delta t_3$$

Al usar las expresiones anteriores para D_1 , D_2 y D_3 en término de las distancias (d_1 , d_2 y d_3) y ángulos (ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3) conocidos e igualando a las distancias que recorre la onda de un anclaje al otro, se obtienen (después de dividir entre c) las siguientes tres ecuaciones lineales:

$$d_1 \left(\cos \phi_1 \frac{\cos \theta}{c} + \sin \phi_1 \frac{\sin \theta}{c} \right) = \Delta t_1$$

$$d_2 \left(\cos \phi_2 \frac{\cos \theta}{c} + \sin \phi_2 \frac{\sin \theta}{c} \right) = \Delta t_2$$

$$d_3 \left(\cos \phi_3 \frac{\cos \theta}{c} + \sin \phi_3 \frac{\sin \theta}{c} \right) = \Delta t_3$$

Las ecuaciones anteriores constituyen un sistema de tres ecuaciones con dos incógnitas: $\cos \theta/c$ y $\sin \theta/c$. Como es un sistema sobredeterminado, la solución se debe representar por el ajuste de mínimos cuadrados a las incógnitas. De los valores de $\cos \theta/c$ y $\sin \theta/c$, fácilmente se obtienen θ y c mediante:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\cos \theta/c}{\sin \theta/c} \right) = \arctan(\tan \theta)$$

$$c = \left[\frac{1}{(\cos \theta/c)^2 + (\sin \theta/c)^2} \right]^{1/2}$$