

Tesis defendida por

Luis Erasmo Miranda Bojórquez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Juan Manuel López Mariscal

Director del Comité

Dr. Julio Candela Pérez

Miembro del Comité

Dr. Paula Pérez Brunius

Miembro del Comité

Dr. Helmut Maske Rubach

Miembro del Comité

Dr. Jesús Manuel Figueroa Rodríguez

*Coordinador del programa de
posgrado en Oceanografía Física*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

15 de noviembre de 2012

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



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Caracterización de las corrientes en las entradas y
alrededores de la Bahía de Todos Santos**

Tesis

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

Presenta:

Luis Erasmo Miranda Bojórquez

Ensenada, Baja California, México.
2012

Resumen de la tesis de Luis Erasmo Miranda Bojórquez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física. Ensenada, Baja California. Noviembre de 2012.

Caracterización de las corrientes en las entradas y
alrededores de la Bahía de Todos Santos

Resumen aprobado por:

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Director de Tesis

Se presenta el primer estudio de largo periodo de las corrientes en la Bahía de Todos Santos (BTS) y sus alrededores usando datos de perfiladores acústicos Doppler anclados al fondo. Se utilizan datos de 10 perfiladores acústicos Doppler de octubre del 2007 a septiembre del 2008, cuatro perfiladores se colocaron en la entrada norte, entre San Miguel y la Isla Todos Santos (ITS), y otro en el cañón entre Punta Banda y la ITS. En la parte exterior se instalaron 3 perfiladores, mientras que dos más se instalaron en zonas someras del interior de la bahía. Al interior de la BTS se encontraron velocidades promedio de 5 cm s^{-1} con máximas de 30 cm s^{-1} . En la entrada norte se encontraron velocidades promedio de 7 cm s^{-1} hacia el interior de la BTS con máximas de hasta 30 cm s^{-1} . En los anclajes exteriores se encontraron velocidades predominantes hacia el norte y noroeste con velocidades promedio de entre 6 y 12 cm s^{-1} por debajo de los 50 m . En dos de los anclajes exteriores se presenta un máximo subsuperficial de la corriente hacia el polo alrededor de los 100 m y con intensidades mayores en verano y otoño. Se identifica a este máximo con la contra corriente subsuperficial que se presenta cerca de la costa en el sistema de la corriente de California con características hidrográficas de agua menos salina que la reportada anteriormente para la misma zona. Se encontró que el viento local se relaciona solo con las corrientes en la entrada norte y en la superficie del cañón a las frecuencias de 0.17 y 0.3 cpd . La mayor energía de las corrientes en ambos lugares se encuentra en periodos alrededor de 20 días, en donde también se encontró una fuerte coherencia entre las corrientes en ambas entradas. La coherencia entre el cañón y la entrada norte decrece de la costa hacia la isla y está asociada tanto con las corrientes más superficiales (en fase) y como a 150 m ($\sim 180^\circ$ fuera de fase) en el cañón. A las frecuencias coherentes, corrientes ascendiendo por el cañón a 150 m , por debajo de la picnoclina, anteceden por 90° a un mínimo de presión en la entrada norte y en fase se presentan intensificaciones de las corrientes hacia el sur en ambas entradas. Se propone un modelo conceptual para explicar este fenómeno. Se encontraron evidencias de que el gradiente de presión a lo largo de la costa está relacionado con las corrientes en la superficie y a 150 m en el cañón y que es importante en la intensificación hacia el norte de la contracorriente subsuperficial.

Palabras Clave: Circulación Costera, Bahía de Todos Santos, Sistema de la corriente de California, Corriente subsuperficial hacia el polo.

Abstract of the thesis presented by Luis Erasmo Miranda Bojórquez as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Physical Oceanography. Ensenada, Baja California. November, 2012.

Characterization of the currents at the entrances
and around Todos Santos Bay

Abstract approved by:

Dr. Juan Manuel López Mariscal
Thesis Adviser

Using data from bottom mounted Doppler acoustic profilers, we present the first long-term observations of currents in Todos Santos Bay (TSB) and its surroundings. Data from 10 Doppler acoustic profilers were used between October 2007 and September 2008. Four profilers were placed at the northern entrance of the bay between San Miguel and Todos Santos Island (TDI), one was placed between Punta Banda and the TDI, three profilers were installed outside of the bay, and two were installed in the shallow part of the Bay. Within the TSB, mean speeds of about 5 cm s^{-1} with maxima of about 30 cm s^{-1} were found. Average speeds at the northern entrance were about 7 cm s^{-1} into the TSB with maxima of about 30 cm s^{-1} . At the external moorings, mean velocities to the north and northwest with speeds between 6 and 12 cm s^{-1} below 50 m were found. We found a maximum poleward subsurface flow around 100 m depth, with maximum intensities during summer and autumn, at two of the external moorings. This subsurface maximum is identified with the poleward undercurrent, which occurs near the coast in the California Current system. However, we found lower salinity characteristics than previously reported for the undercurrent in the same region. The local wind is only related to currents at the northern entrance and with canyon surface currents in the 0.17 and 0.3 cpd frequency bands. At these points the greatest part of the current energy is found around the 20 day period, where a strong coherency between the flows at both entrances was found. The coherency between the canyon and the northern entrance decreases from the coast to the island and is associated with both surface currents (in phase) and 150 m deep currents ($\sim 180^\circ$ out of phase) in the canyon. At the coherent frequencies, up-canyon currents at 150 m depth below the pycnocline, lead by a 90° subsurface pressure minimum at the northern entrance, and near-surface southward currents are in phase at both entrances. A conceptual model is proposed to explain this phenomenon. We found evidence that the along-coast pressure gradient is related to currents at the surface and at 150 m depth in the canyon, and contributes to the intensification of the poleward undercurrent.

Keywords: Coastal Circulation, Todos Santos Bay, California Current System, poleward undercurrent

Dedicatoria

*Dedico esa tesis con mucho cariño a **mis padres**, por haberme dado el ejemplo y la educación y a **mis hermanos** que aunque estando lejos nunca hemos estado separados.*

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento es a Manuel López. Por haberme allanado el camino, por nunca dudar de mí y por estar siempre presente. Sin él esta investigación no hubiera sido posible.

A los miembros del comité de tesis: Paula Pérez Brunius, Julio Candela Pérez, Helmut Maske Rubach, por sus comentarios y sugerencias.

Gracias a quienes son mis ejemplos a seguir Reginaldo *Chief* Durazo y Julio Figueroa, que desde antes de entrar al posgrado me han apoyado con sus sugerencias académicas y de la vida. Son muchas las quesadillas que les tengo que pagar.

Agradezco a mis amigos Jushiro y Griselda por siempre tener la mano extendida para cuando lo necesitara. A Paul por ser un amigo y compañero de la vida y haber alcanzado juntos nuestros sueños en Ensenada. A Paty que siempre creyó en mí.

Expreso mi gratitud a Jessica, por darme los ánimos en los momentos más difíciles, por nunca haber dejado de ser mi amiga a pesar de todo, por ser alguien en que siempre pude confiar y haber compartido el tan necesario café, ingrediente esencial en esta tesis.

A Gilberto Gaxiola, por haberme otorgado un lugar cómodo, climatizado y privilegiado para hacer esta investigación. También a Manuel, Elizabeth y Eliana con quienes he compartido este espacio común y han tenido que soportar mis altas y mis bajas.

A mis compañeros de generación Renzo, Erika y Julio

A CICESE que ha sido mi casa en los últimos cuatro años, que me brindó trabajo, un lugar, recursos materiales y sobre todo apoyo académico en el Departamento de Oceanografía Física.

Al CONACyT, al Posgrado de Oceanografía Física y al proyecto metoceanico financiado por Pemex por el apoyo económico recibido a través de las becas de posgrado. Al proyecto “Circulación y Procesos Físicos en la Bahía de Todos Santos, B. C.” (clave U50122-F) financiado por CONACyT y bajo el cual se tomaron recabaron las observaciones utilizadas en este trabajo

Contenido

	Página
Resumen en español	i
Resumen en inglés	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tablas	ix
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Motivación y Objetivos.....	7
Capítulo 2 Datos y métodos de análisis	8
2.1 Datos.	8
2.2 Tratamiento preliminar.	10
2.3 Estadística descriptiva.....	10
2.4 Funciones Empíricas Ortogonales.	11
2.5 Espectros (simples y rotacionales), método de Welch y como calcular espectros utilizando datos con huecos.	12
Capítulo 3 Resultados	14
3.1 Series de tiempo y estadísticas básicas.	14
3.2 Espectros de las corrientes.	23
3.3 Relación entre el esfuerzo del viento y las corrientes en la bahía.	25
3.4 Funciones empíricas ortogonales.....	27
3.5 Coherencias.....	30
3.6 Datos Hidrográficos	39
Capítulo 4 Discusión	43
4.1 Relación entre el esfuerzo del viento y las corrientes en la entrada norte.	43
4.2 Relación entre las corrientes de la entrada norte y las corrientes en el cañón.	44
4.3 Gradiente de presión a lo largo de la costa.	49
4.4 Presencia de la Contracorriente Subsuperficial.	51
Capítulo 5 Conclusiones	54
Bibliografía	56

Lista de Figuras

Figura	Página
1 Mapas del área de estudio. En el cuadro del lado derecho se muestra una ampliación de la Bahía de Todos Santos. En los mapas se muestran el sensor de presión en Santa Rosaliita (\blacktriangle); estación mareográfica en San Diego (\blacktriangle); los anclajes de ADCP someros (\star); los anclajes de ADCP profundos (\blacktriangledown); el anclaje de microcats (\square); Sensor de presión en Punta Banda (\bullet) y la estación meteorológica (\otimes).	2
2 Promedio y elipse de varianza para las corrientes promediadas verticalmente.	15
3 Velocidades promedio para los anclajes someros. Los primeros cuatro de izquierda a derecha corresponden a los anclajes en la entrada norte de la bahía ordenados desde la ITS hacia la costa. Los anclajes interiores son el de boya de marcación (BM) y Rincón de ballenas (RB). El vector indica la velocidad promedio (cm s^{-1}) a esa profundidad y su dirección geográfica (norte hacia arriba).	17
4 Velocidades promedio para anclajes profundos. El vector indica la velocidad promedio (cm s^{-1}) y su dirección geográfica a esa profundidad.....	18
5 Dirección de las corrientes promedio y dirección del eje de máxima varianza de los anclajes profundos.....	19
6 Desviación estándar a lo largo de los ejes de máxima y mínima varianza y magnitud del promedio de las corrientes para los anclajes profundos.	20
7 Promedios y elipses de varianza estacionales para las corrientes en los primeros 200 m de profundidad o hasta el fondo en el caso de los anclajes más someros.	21
8 Velocidad a lo largo de la costa medida en los anclajes externos. El eje vertical es profundidad (m). Los valores están en cm s^{-1} . En el título se indica la orientación, con respecto al E, de la componente de velocidad utilizada. Estas orientaciones son el promedio vertical de las orientaciones del eje de máxima varianza. Velocidades positivas indican flujo hacia el polo.....	23
9 Espectros rotacionales de las corrientes en: (A) Centro de la entrada norte; (B) Cañón; (C) Punta Banda Exterior; (D) Punta Banda Interior. Las unidades son $\log_{10}(\text{cm}^2 \text{s}^{-2} \text{cpd}^{-1})$. Las líneas punteadas indican la frecuencia de 1/15 cpd.	24
10 Coherencia entre el esfuerzo del viento local favorable a la surgencia y las corrientes ingresando a la BTS por la EN y las corrientes a 40 m saliendo por el cañón (par de paneles inferiores). Las fases positivas indican que el esfuerzo del viento antecede a las corrientes. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.	26
11 (A) Estructura vertical del primer modo empírico de las corrientes en El Cañón de Punta Banda, el porcentaje de varianza total explicada por este modo es de 39.6%. (B) Porcentaje de la varianza explicada por este modo a cada una de las profundidades.	27

Lista de Figuras (Continuación)

Figura	Página
12 (A) Estructura vertical del primer modo empírico de las corrientes en el anclaje San Miguel en la entrada norte. (B) Igual que (A) pero para el anclaje del centro de la entrada norte. (C) Serie de tiempo correspondiente a la estructura vertical mostrada en (A) y serie de tiempo del primer modo empírico del cañón mostrado en la Figura 11. La correlación entre estas series es de 0.70.....	29
13 (A) Estructura vertical del primer modo empírico de las corrientes en Punta Banda Exterior. (B) Porcentaje de la varianza explicada por este modo a cada una de las profundidades.	30
14 Coherencias y fases entre la serie de tiempo del primer FEO del cañón y las series de tiempo del primer FEO de los anclajes de la EN. De arriba a abajo están las coherencias para los anclajes de la ITS, CEN y SM, respectivamente. Las fases positivas indican que las corrientes en la cañón anteceden a las corrientes en la entrada norte. La línea horizontal indica las coherencias mínimas que son significativamente distintas de cero al 95% de confianza.....	31
15 Coherencias entre las corrientes entrando a la bahía (-30°) a todas las profundidades de los anclajes del centro de la entrada norte (CEN) y San Miguel (SM) y las corrientes saliendo de la bahía (-135°) a todas las profundidades en el anclaje del cañón. Se muestran las coherencias para las bandas de 1/20 y 1/15 cpd para el CEN (A y B) y para SM (C y D), respectivamente. Las líneas punteadas negras indican las regiones donde la coherencia es significativa con un 95% de confianza. Ancho de banda: 1/60 cpd.	32
16 Series de tiempo y correlación de la presión subsuperficial del sensor de Punta Banda y la presión en San Miguel cerca del fondo a 40 m	33
17 Coherencia y fase entre la serie de tiempo del primer FEO del cañón y la presión subsuperficial en el anclaje de SM. Las fases positivas indican que las corrientes cañón abajo anteceden a un máximo de las anomalías de presión. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.....	34
18 Densidad espectral de la serie de tiempo del primer FEO de las corrientes en El Cañón de Punta Banda (gris oscuro) y para el anclaje de San Miguel (gris claro). Las áreas sombreadas indican el nivel de confianza al 95%.....	35
19 Coherencia entre la fuerza del gradiente de presión entre Santa Rosaliita y San Diego y la serie de tiempo del primer FEO de las corrientes en el cañón. Las fases positivas indican que la FGP antecede a corrientes hacia el norte en la superficie y a corrientes cañón abajo por debajo de los 100 m. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.	36

Lista de Figuras (Continuación)

Figura	Página
20 Coherencia y fase entre la fuerza del gradiente de presión (FGP) entre Santa Rosaliita y San Diego con el componente a 45° de las corrientes en el cañón a 40 m (paneles superiores), y a 150 m (paneles inferiores). Las fases positivas indican que anomalías positivas en la FGP antecede a corrientes cañón arriba (entrando a la bahía). La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.	37
21 (A) Estructura vertical del primer modo empírico del componente a 116° de la aceleración en Punta Banda exterior, el porcentaje de varianza total explicada por este modo es de 33.3%. (B) Porcentaje de la varianza explicada por este modo a cada una de las profundidades.	38
22 Coherencia entre la fuerza del gradiente de presión (FGP) entre Santa Rosaliita y San Diego y la serie de tiempo del primer FEO de las aceleraciones a lo largo de la costa en PBE (Figura 21). Las fases positivas indican que la FGP antecede a aceleraciones hacia el norte en PBE. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.	38
23 Mapa de estaciones donde se realizaron lances hidrográficos en la campaña de abril-2008 (●). Se sobrepone la localización de los anclajes de ADCP (■). Se indica la línea de estaciones E2 que se utilizaron para la Figura 24.	39
24 Sección de salinidad a partir de lances de CTD en la línea E2 durante el crucero del 6 de abril del 2008. Las líneas verticales indican la posición más cercana al transecto de los anclajes de Punta Banda Exterior y Punta Banda Interior.	40
25 Perfiles de CTD de temperatura (A, D, G), densidad (B, E, H), Salinidad (C, F, I), más cercanos al anclaje de Punta Banda Exterior (PBE) para los cruceros de Enero 18 (A, B, C), Abril-6, (D, E, F), Agosto-16 (G, H, I). Se sobrepone el perfil promedio de 30 días de la componente de la velocidad a lo largo de la costa (116°) en PBE centrado alrededor de la fecha del crucero. Las líneas verticales indican los valores de las propiedades hidrográficas para el núcleo de la contracorriente subsuperficial según Gay y Chereskin (2009) y Linacre <i>et al</i> (2010).	42
26 Esquema conceptual de la relación entre las corrientes a 150 m en el cañón y las corrientes en la EN. Se muestra el perfil de batimetría en una sección a lo largo del cañón, la línea vertical indica la posición relativa del anclaje del cañón. La línea ondulada debajo de los 100 m de de profundidad representa la pycnoclina.	47
27 Profundidad de la isoterma de 10°C en el cañón de abril del 2010 hasta febrero del 2011. La curva roja es la serie filtrada para eliminar mareas y oscilaciones inerciales. .	48

Lista de Tablas

Tabla	Página
I Tabla I Posición de los anclajes de ADCP y periodos cubiertos. Entre paréntesis se indican la profundidad y el intervalo de muestreo correspondientes a los sensores de temperatura. Un anclaje estuvo compuesto únicamente por cuatro sensores de temperatura.....	9

Capítulo 1

Introducción

Las bahías y otros cuerpos costeros similares son zonas donde ocurren procesos físicos y biológicos que son de relevancia para las actividades humanas que se desarrollan alrededor de estos. El conocimiento de la circulación del agua en las bahías permite tener un mejor entendimiento de dichos procesos y con ello diseñar una planeación más adecuada de las actividades humanas dentro del cuerpo costero.

La Bahía de Todos Santos (BTS), ubicada en los $31^{\circ} 48'N$ y $116^{\circ} 42'W$, es un cuerpo de agua semicerrado con una superficie aproximada de 230 km^2 . La bahía tiene dos entradas a mar abierto que están separadas por las Islas de Todos Santos (ITS). La entrada norte está delimitada por las ITS y Punta San Miguel (PSM) y tiene aproximadamente 11 km de ancho y una profundidad máxima de 50 m. La entrada sur de la bahía está delimitada por las ITS y la península de Punta Banda (PB); esta entrada tiene un ancho aproximado de 5 km y en ella se localiza un cañón submarino, el cual llega a los 400 m de profundidad, en la sección entre la ITS y la península de PB (figura 1).

Conocer los patrones de circulación permitiría una mejor planeación de actividades como la navegación, el establecimiento de cultivos acuícolas, el dragado del puerto así como una mejor respuesta ante problemas como descargas de aguas negras o aguas residuales tratadas, florecimientos algales nocivos y derrames accidentales de contaminantes. La BTS ha sido ampliamente utilizada para actividades de pesca, navegación y acuicultura, a pesar de ello aún no se cuenta con observaciones suficientes que establezcan claramente los patrones de circulación de la bahía y sus alrededores. En este trabajo se presenta el primer estudio de corrientes en la BTS de largo periodo basado en observaciones directas usando instrumentos anclados.

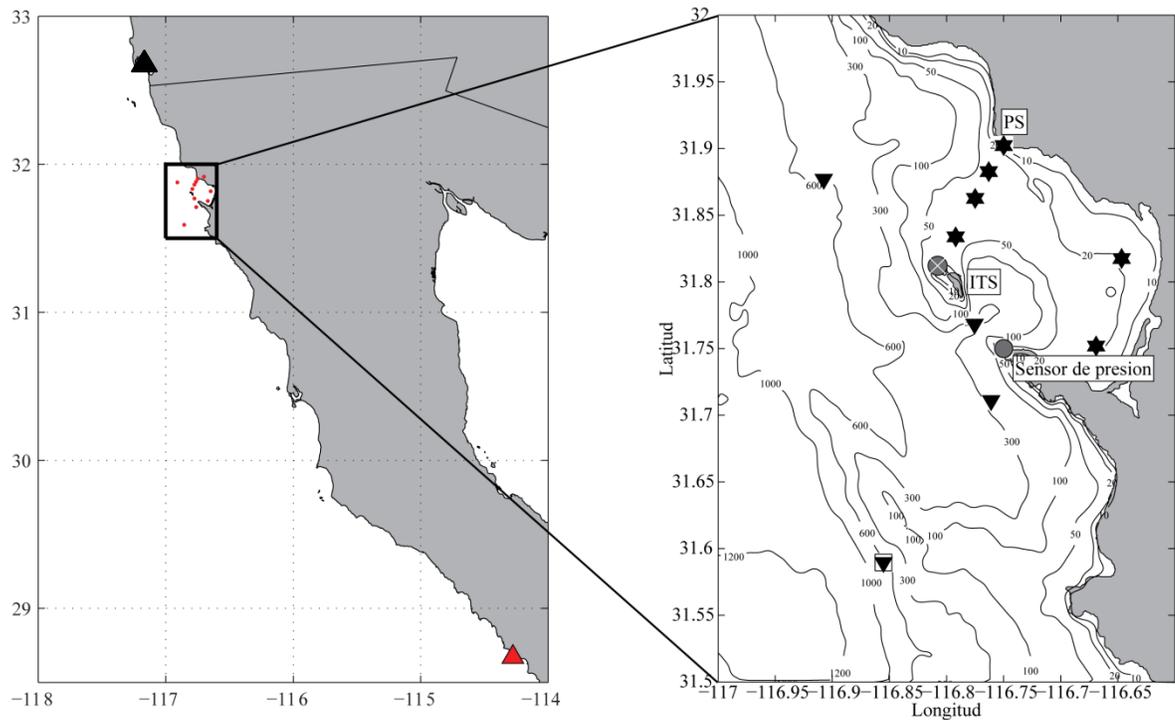


Figura 1 Mapas del área de estudio. En el cuadro del lado derecho se muestra una ampliación de la Bahía de Todos Santos. En los mapas se muestran el sensor de presión en Santa Rosaliita (▲); estación mareográfica en San Diego (▲); los anclajes de ADCP someros (★); los anclajes de ADCP profundos (▼); el anclaje de microcats (□); Sensor de presión en Punta Banda (●) y la estación meteorológica (⊗).

1.1 Antecedentes

Estudios numéricos previos en la Bahía de Todos Santos indican que la circulación en la región de la BTS está influenciada por la el sistema de la Corriente de California. La circulación hacia el interior de la Bahía de Todos Santos está afectada por forzamientos producidos por corrientes externas a la bahía y a su vez el sistema de la corriente de California afecta la circulación costera en la zona adyacente a la BTS. (Mateos *et al*, 2009; Mateos, 2010).

Corriente de California

La corriente de California (CC) viaja en dirección al sureste, aproximadamente paralela a la costa, y se encuentra en la parte oriental del giro subtropical del Pacífico norte. La CC es superficial (0-300 m) y tiene velocidades típicas de 4 a 12 cm s^{-1} y presenta bajas salinidades. En Baja California viaja alrededor de 200 km fuera de la costa (Lynn y Simpson, 1987). La CC puede ser observada en mapas de altura dinámica frente a California y Baja California. La distribución de las características del agua de la corriente de California muestra que existe una fuerte interacción entre el núcleo de la corriente y el campo de giros de mesoescala (Lynn y Simpson, 1987). Los giros de mesoescala se pueden asociar con la varianza de la altura dinámica de la CC, y los valores más altos de esta varianza se encuentran sobre el núcleo de menor salinidad característico de la CC.

La CC alrededor de los 32° N presenta un cambio de dirección hacia la costa, fluyendo hacia el este por unos 200 km. Al aproximarse a la costa, el flujo se bifurca, con una rama fluyendo hacia el noroeste a lo largo de la costa del sur de California, y la otra rama restablece el flujo hacia el sureste. El flujo hacia a la costa presenta las características de un frente y por eso se le ha llamado Frente de Ensenada (Chereskin y Niiler, 1994; Haury *et al.*, 1993). este frente se caracteriza por ser persistente todo el año y altamente productivo (Mateos, 2010). El frente de Ensenada es producto de la interacción de la CC con las irregularidades en la costa y los campos de vientos locales (Pares-Sierra y O'Brien, 1989).

En los 150 km más cercanos a la costa se encuentran dos corrientes de frontera que fluyen hacia el polo. A estas corrientes se le conoce como la Contracorriente Costera (*Inshore Countercurrent* en inglés) y la Contracorriente Subsuperficial (CSS) hacia el polo (*Poleward Undercurrent* en inglés). La contracorriente subsuperficial viaja sobre el borde de la plataforma continental y presenta un máximo entre los 100 y 250 m de 30 a 50 cm s^{-1} , transporta aguas ecuatoriales cálidas y salinas durante casi todo el año (Chelton, 1984; Lynn y Simpson, 1987; Hickey, 1998; Collins *et al.*, 2000; Gay y Chereskin, 2009). Linacre *et al.* (2010) observaron la presencia de esta corriente frente a Ensenada durante todo el año

por medio de velocidades geostróficas estimadas a partir de datos de 47 campañas hidrográficas;

La contracorriente costera ha sido reportada como un flujo estacional que aparece en otoño e invierno (Lynn y Simpson, 1987; Gay y Chereskin, 2009). Lynn y Simpson, (1987) y Durazo *et al* (2010) mostraron que la contracorriente es débil o inexistente frente a las costas de Baja California.

Vientos

Los vientos en el norte de Baja California son paralelos a la costa debido a la cadena de montañas presentes en la península (Álvarez, 1977). La dirección predominante del viento durante el año en la bahía es la del noroeste (49%), en especial en los meses cálidos, con velocidades típicas de 2.5 a 5 m s⁻¹, y los vientos de 5 a 10 m s⁻¹ son comunes (Álvarez, 1977). En la ITS los valores medios del esfuerzo del viento paralelo a la costa son hacia el suroeste (favorables a las surgencias) y con magnitudes bajas que oscilan entre 0.01 y 0.04 Pa dependiendo de si se utilizan datos de viento medidos o estimados a partir de satélites (QuickScat), respectivamente. Los vientos favorables a las surgencias aumentan hacia el sur de la BTS, alcanzando un máximo alrededor de Punta Baja (30° N). Los máximos valores de esfuerzo del viento favorables a las surgencias en la BTS y más al sur ocurren en abril, con un máximo de menor magnitud en septiembre (Pérez-Brunius *et al.*, 2007).

Mediciones de corrientes

Las mediciones directas de las corrientes han sido escasas, el primer trabajo en la BTS puede atribuirse a Barton (1984) quien estudió las corrientes en la BTS por medio de un solo anclaje con tres correntímetros instalado sobre la isobata de los 75 m de profundidad al norte de las Islas Todos Santos cerca de la entrada norte de la BTS. Con un año de datos determinó que las corrientes son cuasi-barotrópicas, que el promedio de las corrientes era menor que las variaciones y que las corrientes están orientadas paralelas a las isóbatas. Además, no encontró una relación clara entre las corrientes y el viento local.

El trabajo más completo fue realizado por Álvarez *et al* (1988) quienes, por medio de trazadores lagrangeanos, encontraron que las corrientes superficiales de la zona sur de la BTS son intensas, con un promedio cercano a 15 cm s^{-1} . Asimismo, identificaron la presencia de un giro ciclónico en la región sur producto de la influencia de vientos provenientes del norte. El patrón de circulación descrito para el promedio en primavera coincide con los campos de velocidad superficial modelados por Mateos (2010) para el mes de mayo.

Modelos numéricos en la zona

La principal forma en que se han estudiado las corrientes en la BTS ha sido a través de modelos numéricos. Gavidía (1988) y Argote *et al* (1991), usando un modelo numérico barotrópico bidimensional, coinciden en que las corrientes de marea tienen poca influencia en la circulación de la BTS. Por medio de modelos numéricos forzados con viento proveniente del noroeste, Gavidía (1988) y Argote *et al* (1991) encontraron que las corrientes superficiales en la BTS tienden a formar un giro ciclónico en el sur de la bahía y uno anticiclónico en la parte norte.

En un modelo baroclínico forzado con datos climatológicos de viento y flujos de calor superficial, Mateos (2010) encontró que el promedio anual del campo de corrientes de mesoescala frente al norte de Baja California y sur de California presenta un giro anticiclónico al sur de las Islas San Clemente. La parte sur de este giro corresponde al Frente de Ensenada. En la modelación numérica encontró una corriente costera superficial angosta (50 km) que viaja cercana a la costa con dirección al ecuador la cual está presente durante todo el año. La corriente costera superficial muestra variaciones estacionales y es más intensa en primavera y verano (hasta de 20 y 12 cm s^{-1} , respectivamente) y más débil en otoño e invierno ($<4 \text{ cm s}^{-1}$). Además, encontró que la CSS frente a la BTS tiene un ancho de alrededor de 80 Km. En base al modelo Mateos (2010) determinó que la CSS es más intensa durante verano y otoño con velocidades máximas de 15 cm s^{-1} a 150 m de profundidad y que durante otoño emerge hasta los 15 m de profundidad.

Para simular las corrientes al interior de la BTS Mateos *et al* (2009) usaron un modelo numérico anidado en una malla regional en la cual impusieron condiciones de frontera obtenidas a partir de datos de temperatura, salinidad y velocidad geostrofica obtenidas del World Ocean Atlas. Encontraron que la BTS tiene dos modos principales de circulación regulados por el flujo a través de sus entradas. En un modo, se presenta un gran giro anticiclónico que cubre casi toda la parte norte de la BTS, acompañado de un giro ciclónico más pequeño al sur de Punta Morro cercano a la rada del puerto. En el otro modo, existe un remolino anticiclónico en la parte norte, un remolino ciclónico más pequeño que cubre la parte sur de la BTS y uno anticiclónico junto a la rada portuaria. Los cambios entre un modo de circulación y otro eran provocados por pequeños cambios en los flujos de las entradas de la bahía.

Mateos (2010), usando el mismo modelo y forzamientos descritos en el párrafo anterior, encontró que la estacionalidad del viento y el flujo de calor influyen en la circulación dentro de la BTS modificando el transporte de agua en las entradas de la bahía. El flujo por las entradas de la BTS tiene fluctuaciones estacionales. En febrero la corriente en las entradas es débil ($\sim 6 \text{ cm s}^{-1}$). En mayo, la corriente es intensa ($\sim 20 \text{ cm s}^{-1}$), entra por la entrada norte de la BTS y sale en su mayor parte por la entrada sur y una menor parte se regresa por la entrada norte. En agosto hay corrientes cercanas a las islas que ingresan por ambas entradas y que salen cerca de las costas de San Miguel y Punta Banda en las capas superficiales. En noviembre, la circulación dentro de la BTS es débil ($\sim 3 \text{ cm s}^{-1}$), y existe un flujo que entra por la entrada norte de la BTS y sale entre las islas y Punta Banda. Asimismo, la circulación en la superficie es anticiclónica.

1.2 Motivación y Objetivos

Esencialmente no existen estudios publicados de corrientes en la BTS y sus alrededores. Por ello, el objetivo principal de este trabajo es hacer una descripción básica de las corrientes en varios puntos de la bahía y sus alrededores en base a series que en su mayoría tienen un año de duración y que cubren casi toda la columna de agua. Se analizan exclusivamente las corrientes medias y sus fluctuaciones subinerciales. Los objetivos específicos son:

- 1) Describir los patrones de circulación en las entradas y alrededores de la BTS en base a observaciones directas de corrientes.
- 2) Determinar la influencia del viento en el forzamiento de las corrientes observadas.
- 3) Encontrar relaciones entre las fluctuaciones de las corrientes en diferentes localidades de la BTS y sus alrededores.
- 4) Determinar la posible influencia de ondas atrapadas a la costa y del gradiente de presión a lo largo de la costa en las fluctuaciones de las corrientes.

Capítulo 2

Datos y métodos de análisis

2.1 Datos.

Este trabajo se basó en datos tomados de septiembre de 2007 a octubre de 2008 provenientes del proyecto “Circulación y Procesos Físicos en la Bahía de Todos Santos, B.C” financiado por CONACYT. De este proyecto se utilizaron datos de corrientes medidas con perfiladores acústicos Doppler colocados en anclajes; presión subsuperficial local y en un sitio 450 km al sur (Santa Rosaliita). Además, se contaron con datos de velocidad del viento de una estación meteorológica ubicada en la Isla Todos Santos; datos de presión subsuperficial estimados en San Diego, California y series de temperatura de termistores colocados junto a uno de los anclajes. También se utilizaron datos de CTD tomados durante tres cruceros que se llevaron a cabo durante enero, abril y agosto del año 2008.

Se obtuvieron perfiles verticales de corrientes utilizando perfiladores acústicos Doppler (ADCP por sus siglas en inglés) anclados cerca del fondo. Los perfiladores se colocaron en 10 diferentes sitios (figura 1): cuatro anclajes cubrieron la entrada norte de la bahía entre Punta San Miguel y la Isla Todos Santos (ITS); un anclaje fue colocado cerca de la rada portuaria, uno más en la parte sur de la bahía frente a la barra del estero en la zona conocida como Rincón de Ballenas. Se colocó también un anclaje sobre El Cañón de Punta Banda entre la ITS y la Península de Punta Banda (PPB). Tres anclajes fueron colocados en zonas aledañas a la BTS, uno cercano a la PPB, uno 20 Km al suroeste de la PPB y uno 10 Km al noreste de la ITS. A estos últimos tres anclajes y al del cañón se les denomina “profundos”.

La estructura de los anclajes consiste en una serie de uno o más instrumentos unidos por una cadena, que se mantiene fija en el fondo por medio de un peso muerto en el extremo inferior y en posición vertical por medio de una boya en el extremo superior. Cercano al peso muerto se coloca un mecanismo liberador que permite recuperar los

instrumentos al activar una señal acústica. Los perfiladores de corrientes se colocaron en la parte inferior y por encima del liberador en sentido vertical cerca del fondo y dirigidos hacia la superficie. En algunos anclajes se colocaron conjuntamente termistores para registrar la temperatura a la profundidad colocada. La profundidad de cada instalación, los periodos cubiertos y el intervalo de adquisición se detallan en la tabla I

Tabla I Posición de los anclajes de ADCP y periodos cubiertos. Entre paréntesis se indican la profundidad y el intervalo de muestreo correspondientes a los sensores de temperatura. Un anclaje estuvo compuesto únicamente por cuatro sensores de temperatura.

Nombre del anclaje	Longitud	Latitud	Intervalo de muestreo (min)	Profundidad (m)	Ancho de celda (m)	Numero de celdas	2007				2008									
							Sep	Oct	Nov	Dic	Enc	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
Boya de marcacion	-116° 38' 48.12"	31° 49' 02.94"	15	23	1	18														
San Miguel Costa	-116° 44' 59.88"	31° 54' 07.74"	60	21	1	17														
Rincon de Ballenas	-116° 40' 08.64"	31° 45' 06.78"	15	23	1	19														
Centro de la Entrada Norte	-116° 46' 29.88"	31° 51' 45.24"	5	41	2	17														
San Miguel	-116° 45' 47.16"	31° 52' 57.60"	5	39	2	16														
Isla Todos Santos	-116° 47' 31.20"	31° 50' 01.44"	5	49	2	21														
Anclaje termistores	-116° 51' 28.02"	31° 51' 28.02"	5	(195,296, 389,457)																
Punta Banda Exterior	-116° 51' 18.78"	31° 35' 22.32"	60 (5)	609 (297)	16	34														
Punta Banda Interior	-116° 45' 39.48"	31° 42' 39.66"	60	320	10	25														
Cañon	-116° 46' 31.56"	31° 46' 05.88"	60	387	16	21														
Salsipuedes	-116° 54' 27.00"	31° 52' 37.02"	60 (5)	588 (587)	16	32														

La estimación de la presión subsuperficial en San Diego se hizo en base a datos horarios de nivel del mar obtenidos del sitio de Mareas y Corrientes de la NOAA (<http://tidesandcurrents.noaa.gov/index.shtml>) y utilizando datos de presión atmosférica superficial del NARR (North American Regional Reanalysis) que se pueden obtener en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.html>. Los datos de presión atmosférica tienen un intervalo de tres horas y se interpolaron linealmente a una hora. Con las series horarias de nivel del mar y presión atmosférica se estimaron las fluctuaciones de la presión subsuperficial en San Diego como

$$p = g\rho_o\eta + p_a$$

donde p es la presión subsuperficial, η el nivel del mar, g la aceleración de la gravedad, ρ_o un valor representativo de la densidad superficial del océano y p_a la presión atmosférica superficial. Tanto η como p_a representan fluctuaciones y por tanto no tienen media.

2.2 Tratamiento preliminar.

El primer tratamiento que se realizó fue el de retirar los datos fuera del agua que fueron almacenados antes de la colocación y después del retiro del anclaje. Estos eventos fueron identificados visualmente en base a la gráfica de la serie de tiempo de los datos del sensor de presión de cada anclaje y en base a anotaciones de bitácora durante la instalación y recuperación de los anclajes.

Los datos de corrientes, presión y temperatura cuyo intervalo de muestreo fue inferior a una hora fueron filtrados con un filtro de Lanczos pasa-bajas que deja pasar la mitad de la potencia a 0.75 cph con fin de eliminar las frecuencias mayores a 1 cph. Posteriormente, los datos se decimaron y se interpolaron para tener un dato a cada hora, coincidiendo con horas no fraccionadas. Por último, los datos se filtraron con un filtro pasa-bajas PL64 que pasa la mitad de la potencia al periodo de 38 horas para eliminar frecuencias inerciales y de marea.

2.3 Estadística descriptiva.

Se calculó la estadística básica que describe el comportamiento de las corrientes en los anclajes instalados. Se calculó el promedio vectorial de las corrientes en toda la vertical, y sus elipses de varianza. También fueron calculados el promedio y las elipses de varianza de acuerdo a las estaciones del año en los primeros 200 m de profundidad. Para describir el comportamiento vertical de las corrientes en los diferentes anclajes se calculó el promedio, el ángulo de máxima varianza, la varianza a lo largo del eje de máxima y mínima varianza para cada profundidad en los anclajes.

2.4 Funciones Empíricas Ortogonales.

En esta sección se describe la aplicación del método de funciones empíricas ortogonales (FEOs) a las dos componentes del vector de la corriente simultáneamente. Mediante los FEOs se representan $2N$ series de tiempo de las componentes de velocidad, $X_k(t)$, como una sumatoria finita de $2N$ distintos modos compuestos por una estructura espacial $E_n(k)$ y un función temporal asociada a cada estructura espacial, $f_n(t)$. La expansión toma la forma:

$$X_k(t) = \sum_{n=1}^{2N} f_n(t) E_n(k)$$

Dado que el conjunto $X_k(t)$ de series de tiempo comprende ambas componentes de velocidad en diferentes localidades, valores distintos del subíndice k pueden representar componentes diferentes en la misma localidad o la misma componente o componentes diferentes en localidades diferentes. Los vectores que dan la estructura espacial $E_n(k)$ están contruidos de tal manera que sean ortonormales, es decir:

$$\sum_{m=1}^{2N} E_i(m) E_j(m) = \delta_{ij}$$

Donde δ_{ij} es la delta de Kronecker. Las funciones empíricas ortogonales están definidas con la restricción de que las amplitudes en tiempo, $f_n(t)$, están no-correlacionadas entre sí:

$$\{f_i f_j\} = \lambda_i \delta_{ij}$$

Siendo $\lambda_i = \{f_i^2\}$ la varianza de la i -ésima amplitud temporal y el operador $\{\}$ representa el promedio temporal de la cantidad contenida dentro de los corchetes. La construcción de los FEOs es tal, que las λ_i son los eigenvalores de la matriz de covarianza

de las observaciones y su suma representa la varianza total (suma de todas las varianzas) de todas las series de tiempo (Emery y Thomson, 1997).

Las propiedades útiles de los FEOs que se aprovechan en este trabajo es la de que se pueden representar las series de tiempo de las corrientes en diferentes modos no correlacionados entre si y que el primer modo recoge la mayor parte de la varianza total de los datos. Con esto podemos representar las $2N$ series de datos con unos pocos modos (usualmente solo el primero). En muchas ocasiones, se puede buscar alguna interpretación física a los primeros modos que explican la mayor parte de la varianza total, sin embargo no hay una garantía de que esto pueda realizarse.

2.5 Espectros (simples y rotacionales), método de Welch y como calcular espectros utilizando datos con huecos.

Se estudiaron las relaciones entre las corrientes de los anclajes usando las funciones de correlación y de coherencia. La correlación (c) en función del desfase (m) entre dos series de tiempo (x y y) de longitud n , y sin valor medio fue calculada usando:

$$c(m) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y (n - |m|)} \sum_{i=K_1}^{K_2} x_{i+m} y_i$$

donde σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de x y y y $K_1 = \max(1, 1 - m)$ y $K_2 = \min(n, n - m)$.

La coherencia cuadrada ($C_{xy}(f)$) entre dos series de tiempo es función de la frecuencia (f) y se calculó con:

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}|^2}{S_{xx} S_{yy}}$$

Donde S_{xy} es el espectro cruzado entre x y y , y S_{xx} y S_{yy} son los autoespectros de x y y , respectivamente. Asociada a la coherencia, está también la función de fase que nos da el desfase entre las dos series de tiempo a cada una de las frecuencias del análisis. La función de fase es la misma que la fase de la función de densidad espectral cruzada. Las funciones de densidad espectral fueron calculadas usando el método de Welch implementado en los programas *cpsd* y *pwelch* del software matlab.

Algunas de las corrientes fueron medidas en más de un periodo de muestreo, por lo que los datos tuvieron huecos dentro de la serie de tiempo, esta situación no permite aplicar directamente el método de Welch. Para poder aprovechar todos los datos en las series con huecos, primero se tomaron los periodos de los datos en ambas series de tiempo que fueran simultáneos. El método de Welch requiere dividir a las series en segmentos de igual longitud (n). Para ello, los periodos simultáneos de las series con huecos, se truncaron al final de cada periodo para que tuvieran una longitud igual a un múltiplo entero de n . Con esto toda la serie es de longitud igual a un múltiplo entero de n y cada segmento está conformado de mediciones consecutivas sin huecos y se puede aplicar el método de Welch dividiendo las series en segmentos de longitud n . Por supuesto, esta técnica no permite la sobreposición parcial de los segmentos de longitud n en la estimación de las diferentes funciones de densidad espectral.

Capítulo 3

Resultados

En esta sección primero se presentan las corrientes medias, sus desviaciones estándar, las series de tiempo para los anclajes externos y los espectros de las corrientes. Después se muestran las relaciones que se encontraron entre el esfuerzo del viento y las corrientes en la bahía. En seguida se presentan las estructuras verticales y las series de tiempo para el modo más relevante de las FEOs. A continuación se exponen las relaciones de las corrientes entre diferentes anclajes. Por último, se exponen los resultados de las observaciones hidrográficas relacionándolas con el anclaje donde se detectó la contracorriente subsuperficial.

3.1 Series de tiempo y estadísticas básicas.

Las corrientes integradas verticalmente en la entrada norte de la bahía (entre San Miguel y la isla de Todos Santos) muestran, en promedio, un patrón de circulación con dirección sur, hacia el interior la bahía (figura 2). Los anclajes en la entrada norte (EN) muestran que, en promedio, el agua ingresa por esta zona. Únicamente el anclaje más somero, a 20 m de profundidad, muestra una salida de agua pegada a la costa. Las elipses en la entrada norte muestran una variación orientada de noroeste hacia el sureste, en la parte interna del sureste de la bahía (Rincón de Ballenas) la elipse de varianza tiene una orientación de suroeste a noreste mientras que el promedio está orientado hacia el noreste. En el anclaje cercano a la rada portuaria la elipse está orientada de manera similar a los de la EN y el promedio es hacia el noroeste. La orientación de las elipses de varianza en los anclajes someros al interior de la BTS sugiere una circulación ciclónica que sale pegada a la costa por la EN.

La estructura vertical de las corrientes medias en la entrada norte presenta las máximas velocidades hacia el interior de la BTS cerca de la superficie y disminuyen hacia el fondo (figura 3). En las corrientes más cercanas a la isla se presenta una inversión de la

dirección a los 30 m (en promedio el agua sale de la BTS por debajo de los 30 m en el anclaje cercano a la Isla), justo donde existe un canal más profundo en la entrada norte. En el anclaje más cercano a la costa, las corrientes presentaron un promedio hacia el exterior de la BTS, las corrientes más intensas están en la superficie y el promedio disminuye hasta hacerse cercano a cero en el fondo a 20 m. En general, las corrientes medias son débiles en la EN y en el interior de la bahía, con valores máximos del orden de 5 cm s^{-1} para los anclajes del centro y suroeste de la EN y menores para el resto de las localidades.

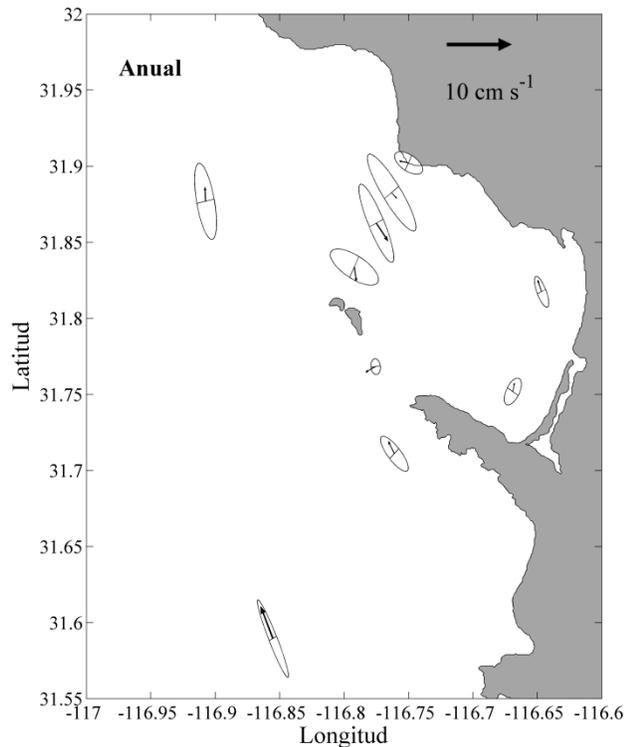


Figura 2 Promedio y elipse de varianza para las corrientes promediadas verticalmente.

Debido al propio funcionamiento los anclajes más profundos colocados en el exterior de la bahía solo se obtuvieron mediciones por debajo de los 50 m de profundidad. En el exterior de la bahía, las corrientes verticalmente integradas por debajo de los 50 m son predominantemente hacia el noroeste (figura 2) y en promedio sobre los primeros 200 m tienen intensidades de 5 cm s^{-1} en Salsipuedes, y 9 cm s^{-1} en Punta Banda Exterior (figura 4). Las elipses de varianza muestran que el eje de máxima varianza está orientado a

lo largo de la dirección promedio. Los anclajes de Punta Banda Exterior (PBE) y Salsipuedes muestran que por debajo de los 50 m de profundidad la velocidad promedio tiene dirección noroeste y norte, respectivamente (figuras 4 y 5). Las máximas intensidades de la corriente para estos dos anclajes se dan por debajo de la superficie, a 80 m en Salsipuedes y como a 120 m para Punta Banda Exterior (figuras 4 y 6). La dirección de la velocidad promedio varía poco (menos de 45°) con la profundidad en los anclajes PBE y Salsipuedes, y la dirección del eje de máxima varianza es muy cercana a la dirección del promedio en casi toda la columna (figura 5). En Punta Banda Interior las corrientes medias son débiles y se presentan dos máximos subsuperficiales, uno a 50 m de profundidad con un promedio 4 cm s^{-1} y otro a 180 m de profundidad con un promedio de 2.5 cm s^{-1} . Por debajo de los 50 m de profundidad la dirección promedio es hacia el nornoroeste en PBI, pero con velocidades promedio máximas menores que las correspondientes en Salsipuedes y PBE.

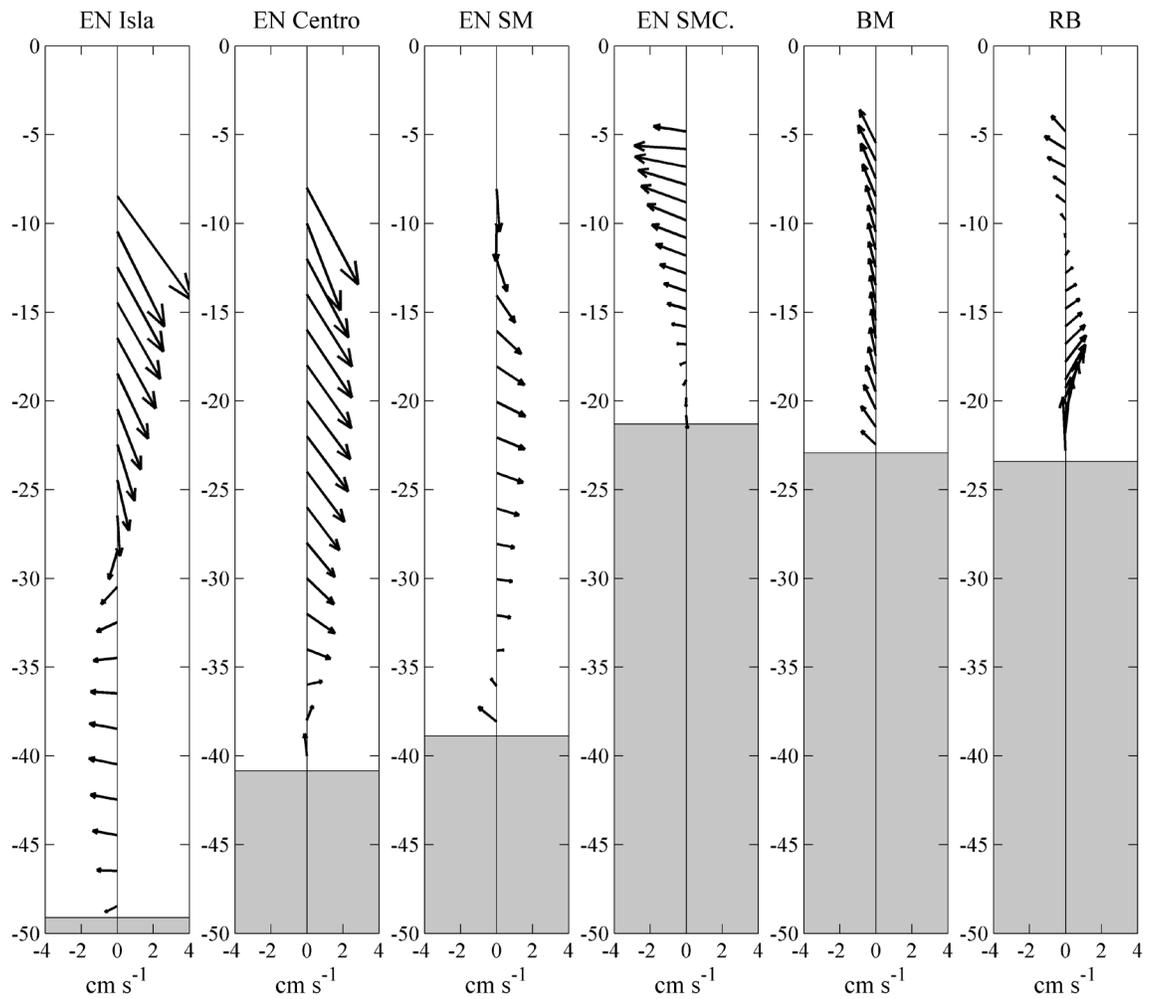


Figura 3 Velocidades promedio para los anclajes someros. Los primeros cuatro de izquierda a derecha corresponden a los anclajes en la entrada norte de la bahía ordenados desde la ITS hacia la costa. Los anclajes interiores son el de boya de marcación (BM) y Rincón de ballenas (RB). El vector indica la velocidad promedio (cm s^{-1}) a esa profundidad y su dirección geográfica (norte hacia arriba).

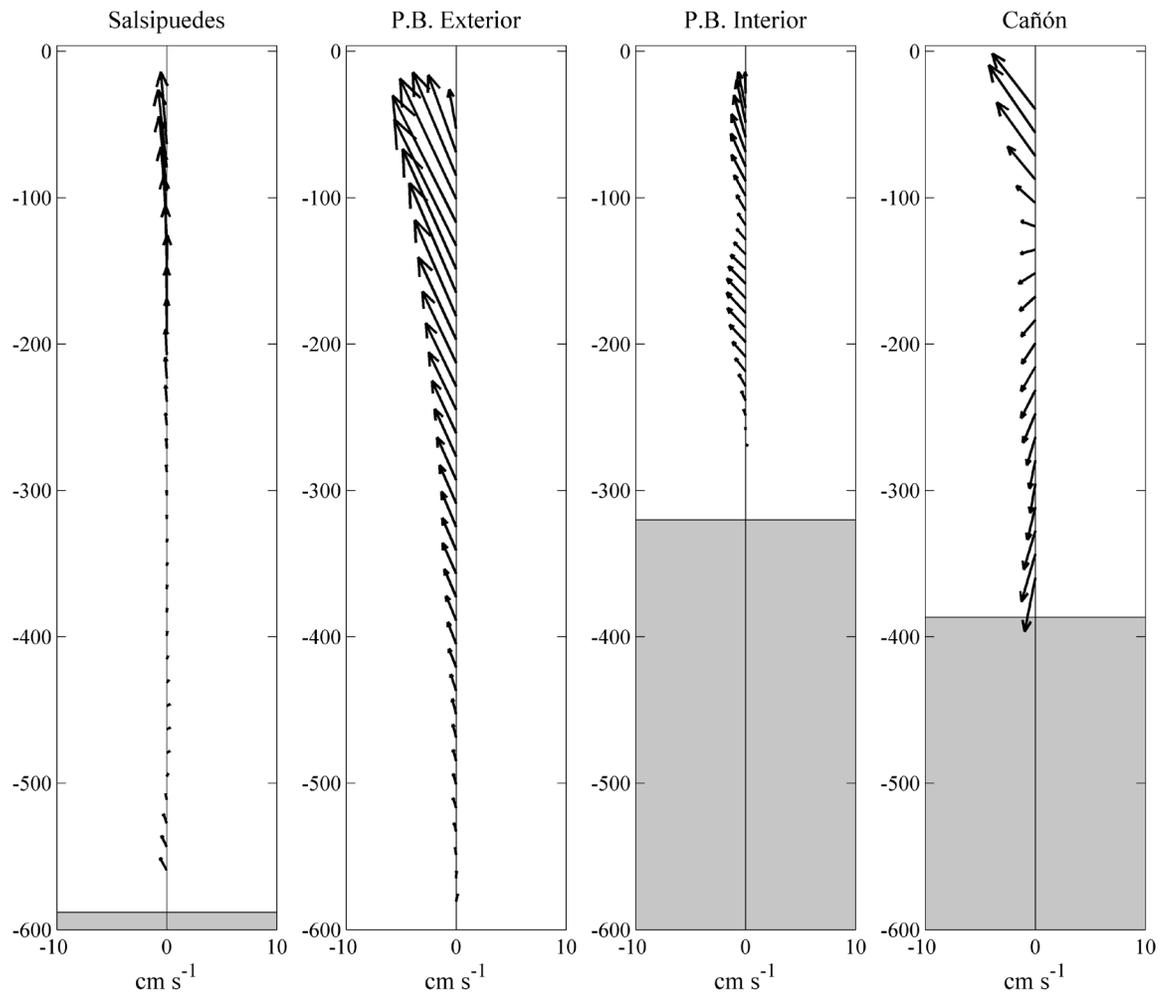


Figura 4 Velocidades promedio para anclajes profundos. El vector indica la velocidad promedio (cm s^{-1}) y su dirección geográfica a esa profundidad.

En el cañón, la estructura vertical de las corrientes medias es más compleja que en los otros anclajes. El máximo de la velocidad está cerca de la superficie (~ 40 m), unos 10 cm s^{-1} con dirección noroeste (aproximadamente paralelo a la costa). Conforme aumenta la profundidad la intensidad de la corriente promedio disminuye hasta los 100 m y vuelve a aumentar hacia la celda más profunda hasta una intensidad de 5 cm s^{-1} (figuras 4 y 6). Las corrientes más someras registradas (~ 40 m) están orientadas hacia el noroeste y giran en sentido ciclónico y de manera abrupta hacia el suroeste entre 100 y 175 m de profundidad. La dirección por debajo de los 175 m es a lo largo del eje del cañón y apuntando hacia afuera de la bahía. En el cañón, las desviaciones estándar máximas ($\sim 8 \text{ cm s}^{-1}$) están cerca

de los 40 m de profundidad pero existe otro máximo subsuperficial ($\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$) alrededor de 150 m. Si bien entre los 40 y 130 m de profundidad la dirección promedio es hacia el noroeste el ángulo del eje de máxima varianza es hacia el norte (figura 5).

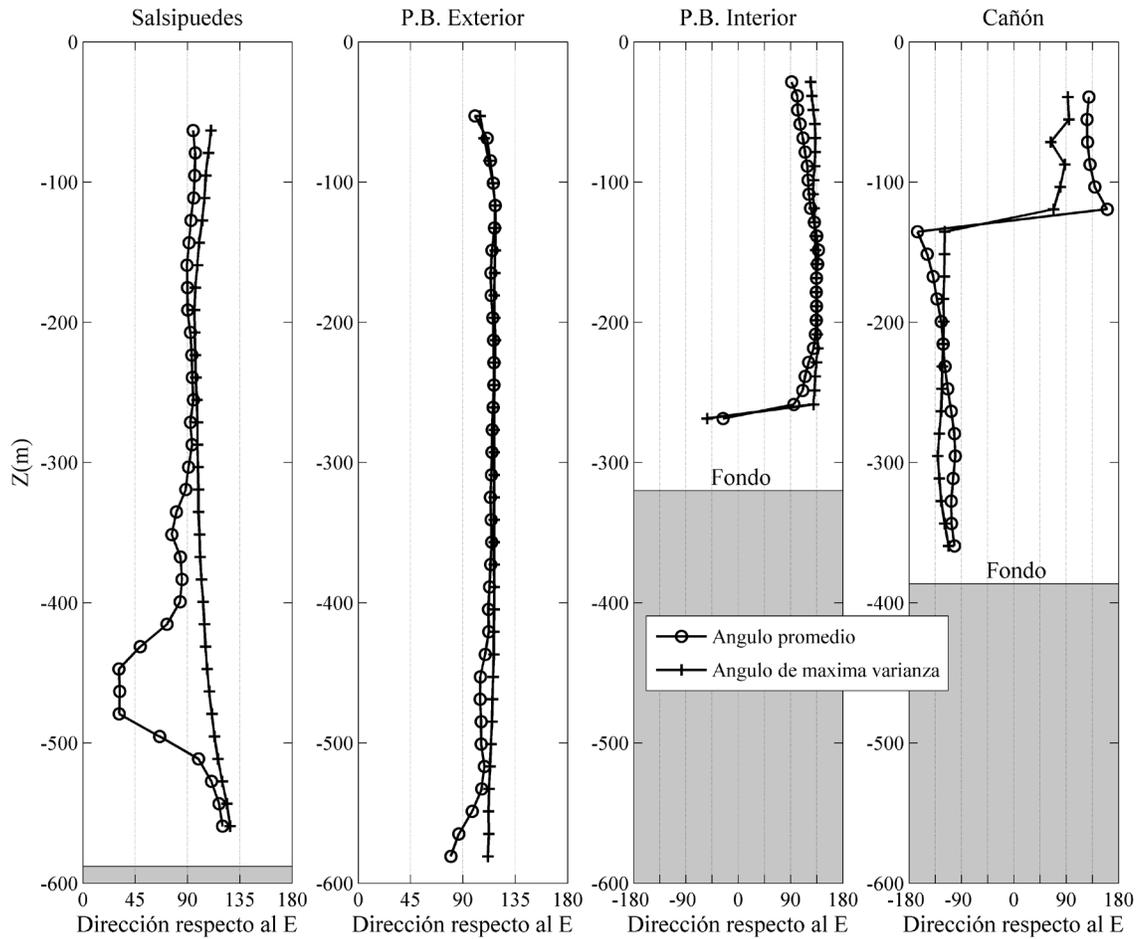


Figura 5 Dirección de las corrientes promedio y dirección del eje de máxima varianza de los anclajes profundos.

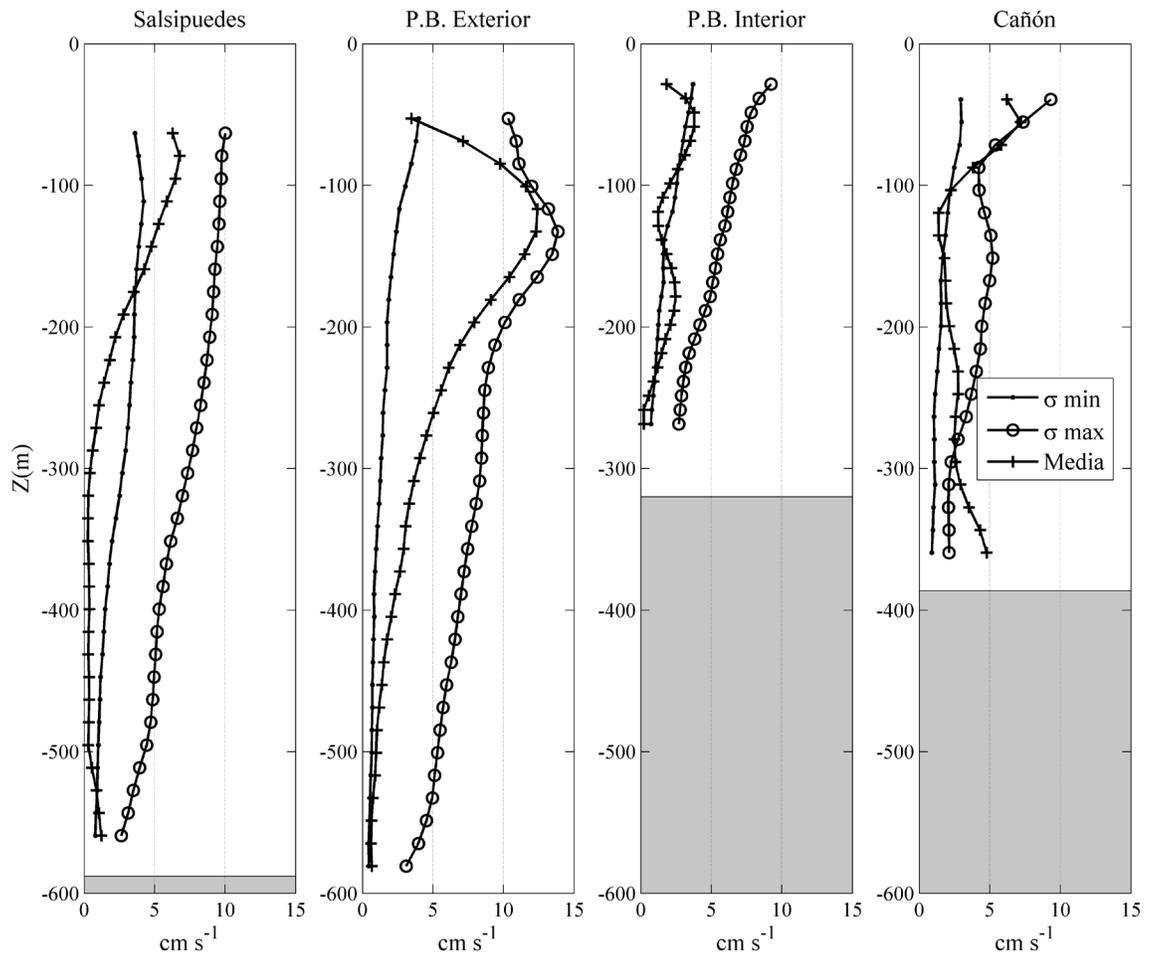


Figura 6 Desviación estándar a lo largo de los ejes de máxima y mínima varianza y magnitud del promedio de las corrientes para los anclajes profundos.

El comportamiento del promedio de las corrientes cercanas a la superficie (entre 40 200 m) y sus elipses de varianza varían a lo largo del año. En el exterior las corrientes superficiales son más intensas en verano y otoño, y más débiles en invierno y primavera. De cualquier manera, el promedio hacia el polo prevalece durante todo el año y en todos los anclajes, incluyendo el del cañón (para la capa superior a los 200 m de profundidad) (figura 7). En el caso de PBE, las corrientes también fueron intensas durante primavera. Las corrientes en las entradas y al interior de la BTS parecen ser más intensas en invierno y no presentan variaciones importantes a lo largo del resto del año.

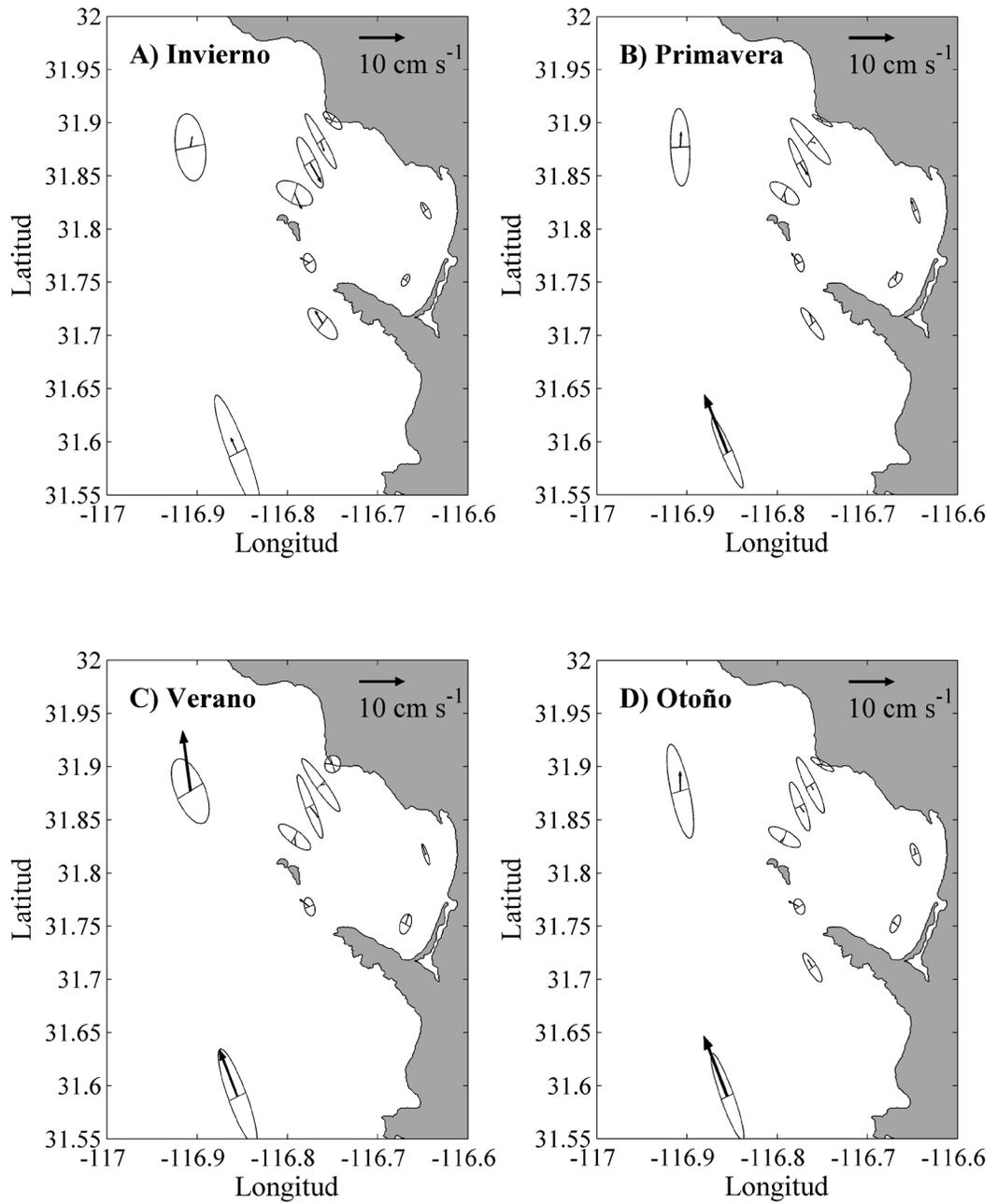


Figura 7 Promedios y elipses de varianza estacionales para las corrientes en los primeros 200 m de profundidad o hasta el fondo en el caso de los anclajes más someros.

La figura 8 presenta las series de tiempo de las componentes de las corrientes a lo largo de la costa para los anclajes exteriores a la bahía. En el caso de PBE, se observa que hay una corriente persistente hacia el polo entre los 50 y 250 m de profundidad que presenta muy pocas inversiones. Las corrientes de los tres anclajes presentan eventos de intensificación hacia el polo, pero son más notorios en PBE por arriba de los 250 m alcanzando velocidades hasta de 30 cm s^{-1} . Algunos de estos eventos llegan hasta los 400 m de profundidad con velocidades de hasta 30 cm s^{-1} y aunque el ADCP no alcanza a medir hasta la superficie es muy posible que estos eventos se extiendan hasta la misma. Estos eventos son predominantes en Punta Banda Exterior mientras que en PBI y Salsipuedes son más débiles y más esporádicos. En algunas ocasiones el flujo presentó una inversión hacia el ecuador. Por ejemplo, un evento a mediados de julio provocó que toda la columna de agua tuviera dirección sureste en PBE aunque esto no se reflejó en los otros anclajes simultáneamente. En Salsipuedes hubo dos eventos de inversión similares en enero y a finales de abril.

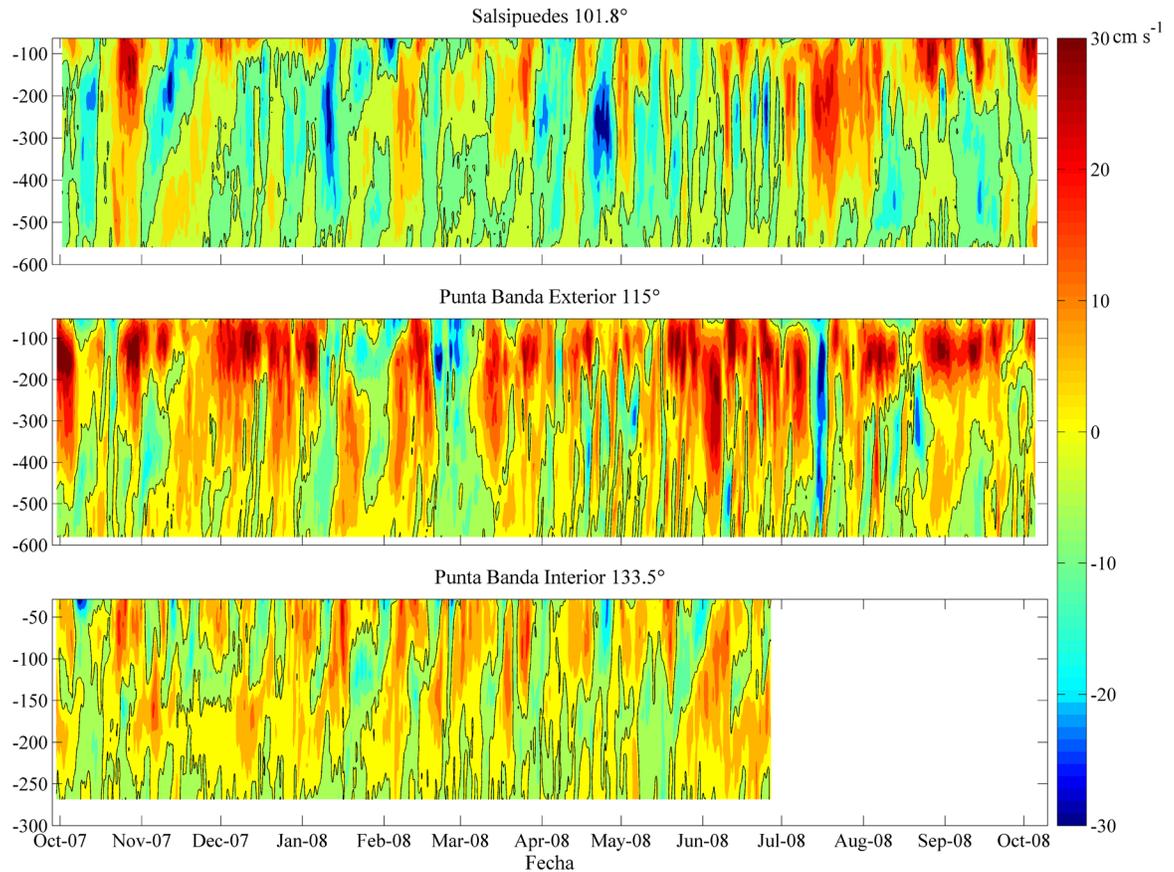


Figura 8 Velocidad a lo largo de la costa medida en los anclajes externos. El eje vertical es profundidad (m). Los valores están en cm s^{-1} . En el título se indica la orientación, con respecto al E, de la componente de velocidad utilizada. Estas orientaciones son el promedio vertical de las orientaciones del eje de máxima varianza. Velocidades positivas indican flujo hacia el polo

3.2 Espectros de las corrientes.

Se calcularon los espectros rotacionales de las corrientes para ver la distribución de la energía con la profundidad independientemente de la orientación del sistema coordinado. En el centro de la entrada norte (figura 9-A) la distribución de la energía es uniforme en toda la columna de agua y se concentra en las bajas frecuencias, menores a 1/15 ciclos por día (cpd). En el cañón la energía no está distribuida de manera uniforme en la columna de agua, cerca de la superficie la energía está contenida en bajas frecuencias menores de 30 cpd, entre 100 y 200 m la energía está concentrada a frecuencias entre 1/20 y 1/5 cpd. Entre

200 y 250 m vuelve a haber cierta energía a bajas frecuencias pero por debajo de los 250 m la energía de las corrientes es considerablemente menor (figura 9-B). En Punta Banda Exterior la energía está concentrada en los primeros 200 m con predominancia de las bajas frecuencias ($<1/20$ cpd), la energía de la banda de $1/30$ cpd es relevante hasta cerca del fondo. Otras dos características interesantes son que entre 50 y 200 m hay energía significativa a $-1/5$ cpd y entre 200 y 350 m los espectros tienden a ser más anchos hasta la banda de $1/5$ cpd (figura 9-C). En Punta Banda Interior la distribución de la energía se concentra en las bandas de $1/15$ cpd hasta los 200 m y $1/8.5$ cpd hasta los 130 m, no se observa energía relevante por debajo de los 200 m de profundidad (figura 9-D).

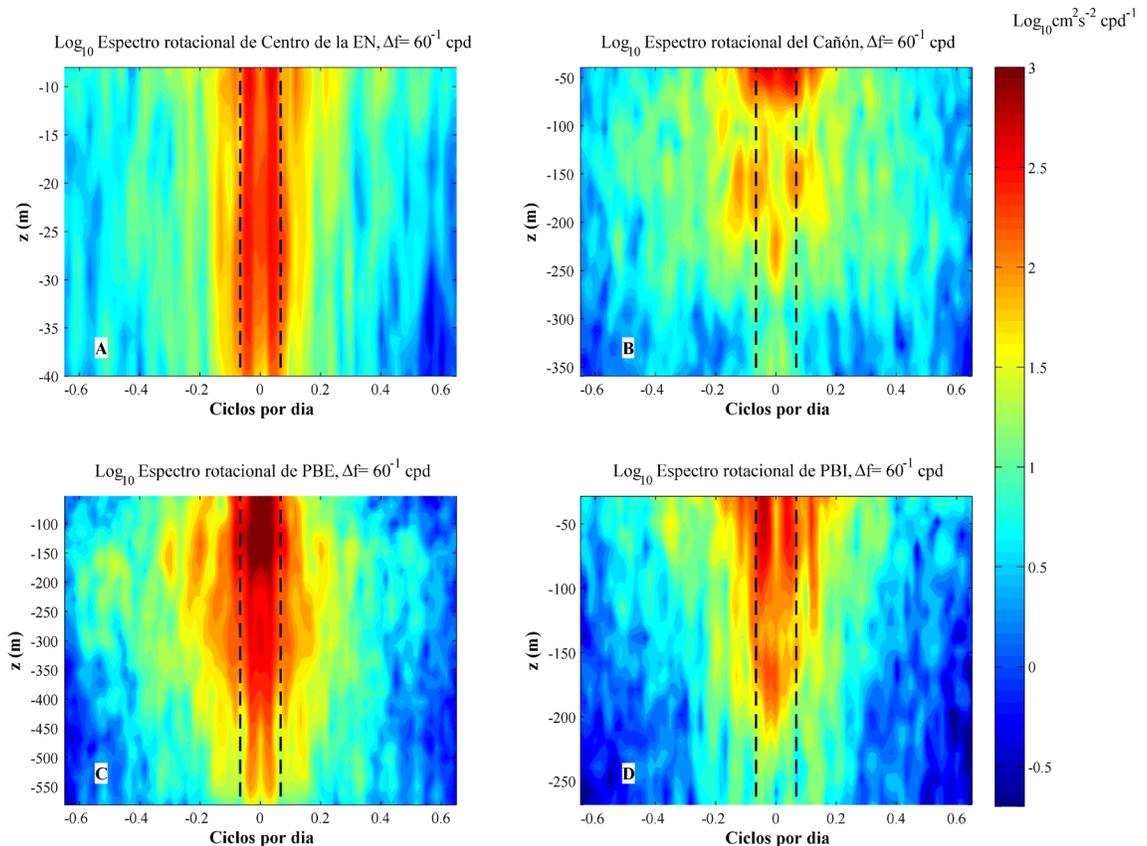


Figura 9 Espectros rotacionales de las corrientes en: (A) Centro de la entrada norte; (B) Cañón; (C) Punta Banda Exterior; (D) Punta Banda Interior. Las unidades son $\log_{10}(\text{cm}^2 \text{s}^{-2} \text{cpd}^{-1})$. Las líneas punteadas indican la frecuencia de $1/15$ cpd.

3.3 Relación entre el esfuerzo del viento y las corrientes en la bahía.

Se exploró de diferentes maneras la relación entre el viento y las corrientes en los anclajes. Solo en la entrada norte y en el cañón se encontraron coherencias significativas entre el esfuerzo del viento paralelo a la costa y las corrientes. Se calculó la coherencia entre el esfuerzo del viento a lo largo de la costa (positivo en dirección favorable a las surgencias) y las corrientes verticalmente integradas ingresando en la EN (positivo a -30° respecto al E). También se comparó el esfuerzo del viento con la medición más superficial de las corrientes saliendo por el cañón a 40 m de profundidad. Se encontró que existe coherencia significativa entre el esfuerzo del viento y las corrientes en la banda de $1/6$ cpd en ambas entradas (figura 10). A esta frecuencia las fases varían entre 90° a 180° indicando que el esfuerzo del viento antecede a las corrientes ingresando por la EN o saliendo por el cañón entre 36 y 72 horas. También se encontró coherencia significativa en el anclaje del centro de la EN a la frecuencia de 0.3 cpd, aunque no se encontró una relación similar con los anclajes adyacentes. No se encontró más relación entre el esfuerzo del viento a distintas direcciones ni con los anclajes al interior de la BTS (Rincón de Ballenas y Boya de Marcación) ni al exterior de la bahía.

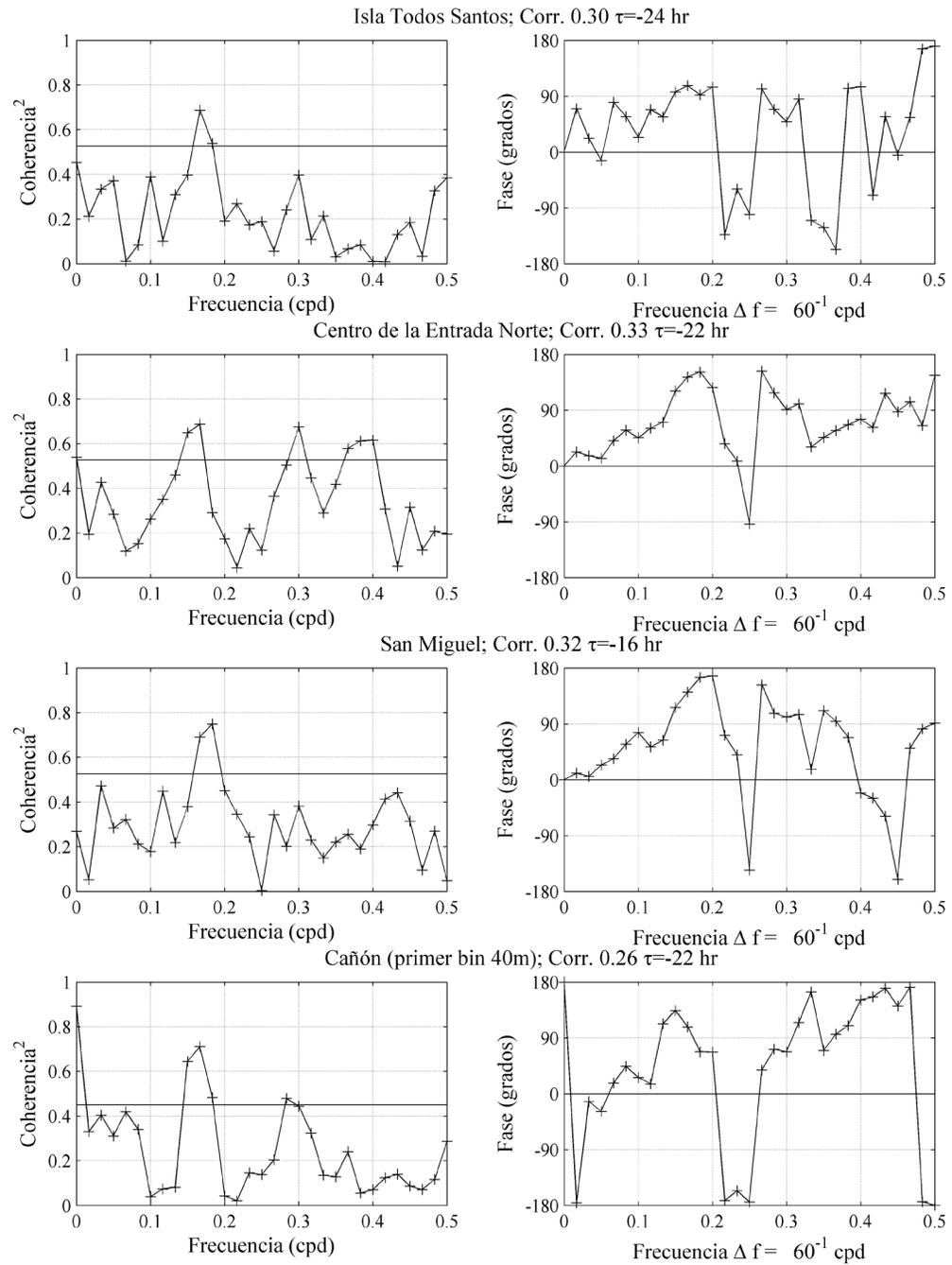


Figura 10 Coherencia entre el esfuerzo del viento local favorable a la surgencia y las corrientes ingresando a la BTS por la EN y las corrientes a 40 m saliendo por el cañón (par de paneles inferiores). Las fases positivas indican que el esfuerzo del viento antecede a las corrientes. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.

3.4 Funciones empíricas ortogonales.

Las funciones empíricas ortogonales (FEOs) de las corrientes en cada anclaje muestran cuales son las estructuras verticales de las fluctuaciones de las velocidades así como la variación temporal de esos patrones verticales. El primer FEO del cañón explica el 39.8% del total de la varianza en ese anclaje. La estructura vertical de este modo muestra dos zonas con comportamiento diferente, en los primeros 100 m las fluctuaciones de las corrientes están alineadas con el eje norte-sur (figura 11-A) y además explican gran parte de la varianza a esa profundidad, siendo casi del 80% para las dos primeras profundidades. Esta varianza explicada decae hasta casi cero a los 100 m de profundidad. Entre los 100 y 200 m de profundidad se encontró otra zona donde el primer FEO del cañón explica una importante parte de la varianza, siendo casi del 50% a los 150 m de profundidad (figura 11-B), en esta zona las corrientes están alineadas en el eje noreste-suroeste, es decir, a lo largo del eje del cañón.

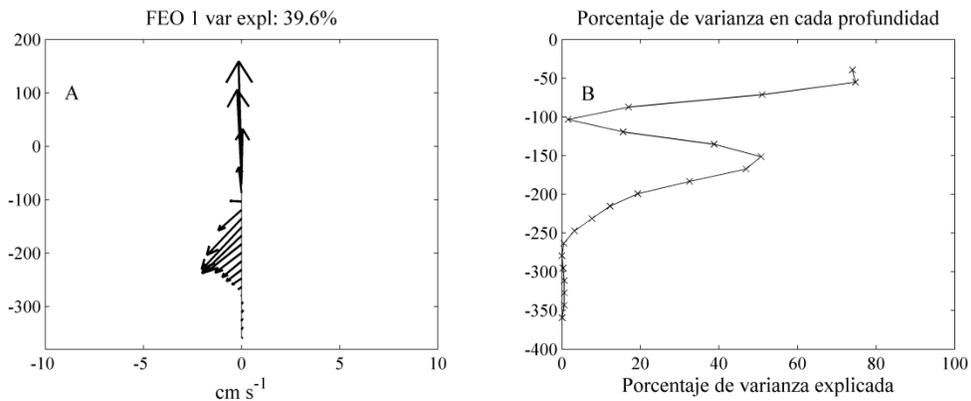


Figura 11(A) Estructura vertical del primer modo empírico de las corrientes en El Cañón de Punta Banda, el porcentaje de varianza total explicada por este modo es de 39.6%. (B) Porcentaje de la varianza explicada por este modo a cada una de las profundidades.

El primer modo de las funciones empíricas ortogonales de las corrientes en los anclajes de San Miguel (SM) y centro de la entrada norte (CEN) explican el 78% y 75% de la varianza, respectivamente (figura 12 A y B). Estos dos modos tienen un comportamiento similar, la estructura vertical de ambos modos tiene una orientación similar,

aproximadamente perpendicular a la entrada norte. La estructura vertical en SM tiene intensidades similares en toda la columna, mientras que la de CEN decrece en los 15 m más profundos (figura 12-B), pero en ambos casos la estructura es aproximadamente barotrópica. El primer FEO del anclaje de la ITS (no mostrado) también tiene un comportamiento similar a sus vecinos SM y CEN.

Las series de tiempo de los FEOs explican cómo varían las estructuras verticales a lo largo del tiempo. Las series de tiempo del primer modo de SM y el cañón se muestran en la figura 12-C. Estas series de tiempo guardan una correlación de 0.70 con la serie del cañón, la cual antecede a la serie de tiempo en SM por 12 horas. La correlación entre ambas series de tiempo indica que cuando se intensifican las corrientes entrando a la bahía por la EN, en el cañón se intensifican las fluctuaciones de las corrientes hacia el sur cerca de la superficie y las fluctuaciones de las corrientes entrando al cañón (cañón arriba) alrededor de 150 m. Nótese que la intensificación de las corrientes hacia el sur cerca de la superficie en el cañón implica que también se intensifica la componente saliendo de la bahía.

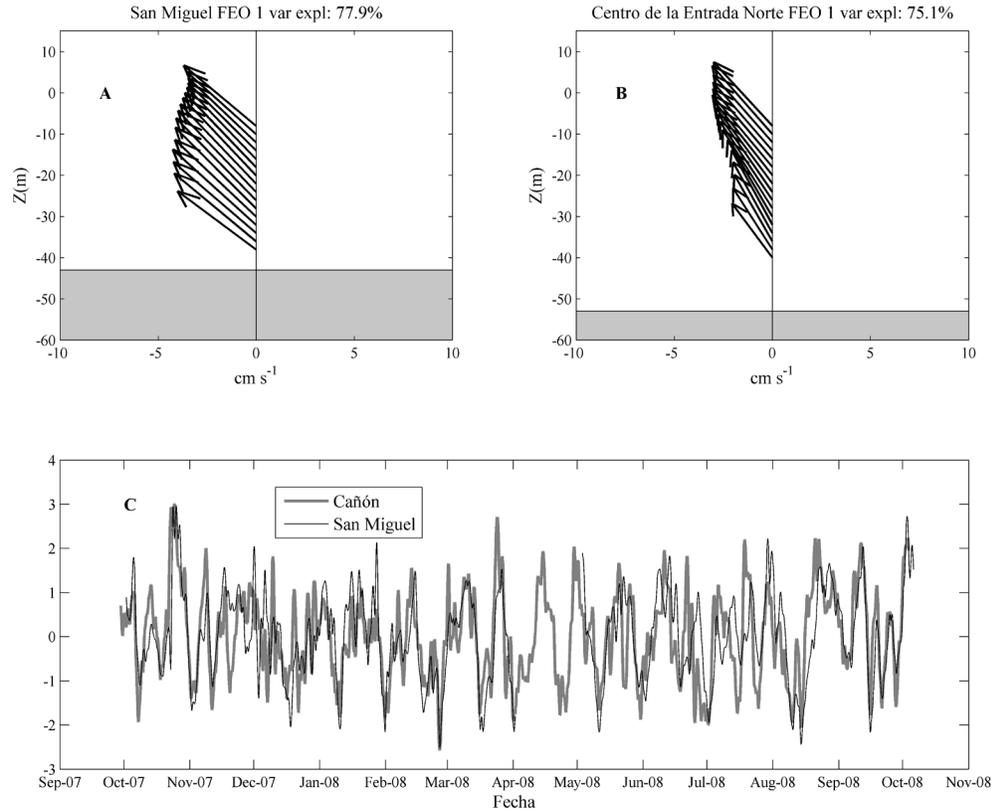


Figura 12 (A) Estructura vertical del primer modo empírico de las corrientes en el anclaje San Miguel en la entrada norte. (B) Igual que (A) pero para el anclaje del centro de la entrada norte. (C) Serie de tiempo correspondiente a la estructura vertical mostrada en (A) y serie de tiempo del primer modo empírico del cañón mostrado en la figura 11. La correlación entre estas series es de 0.70.

El primer modo empírico del anclaje en Punta Banda Exterior (PBE) explica el 56.7% de la varianza total del anclaje y se muestra en la figura 13. La estructura vertical del primero FEO (figura 13-A) tienen un máximo de intensidad subsuperficial a ~135 m y decrece hacia el fondo, éste máximo coincide con el máximo de la media. El primer modo explica hasta un 80% de la varianza entre los 100 y 200 m de profundidad donde coincide con el máximo subsuperficial (figura 13-B).

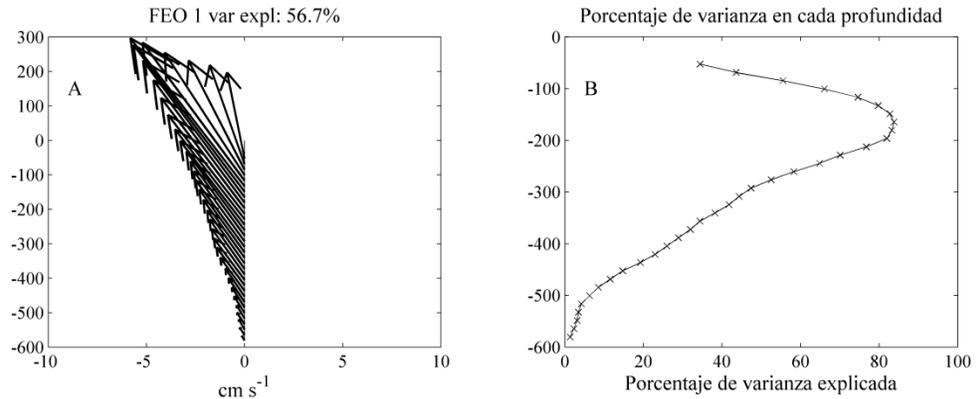


Figura 13(A) Estructura vertical del primer modo empírico de las corrientes en Punta Banda Exterior. (B) Porcentaje de la varianza explicada por este modo a cada una de las profundidades.

3.5 Coherencias

Se calcularon las coherencias entre las series de tiempo del primer FEO de cada anclaje de la entrada norte y el cañón (figura 14). Para los tres anclajes utilizados la coherencia fue significativa en la banda entre los 15 y 20 días. Es importante notar que la coherencia entre las corrientes del cañón y la EN aumenta significativamente de la ITS hacia SM, alcanzando coherencias muy cercanas a 1 para la banda de 20 días con las corrientes en SM. Las corrientes en el Centro de la EN entre 0.2 y 0.25 cpd también son coherentes con corrientes en el cañón. Para todas las frecuencias donde hubo coherencia significativa la fase es cercana a cero. Esto implica que una entrada (salida) de agua en la entrada norte es casi simultánea a una salida (entrada) de agua cerca de la superficie en la entrada del cañón, y con corrientes entrando hacia el cañón (cañón arriba) a unos 150 m de profundidad.

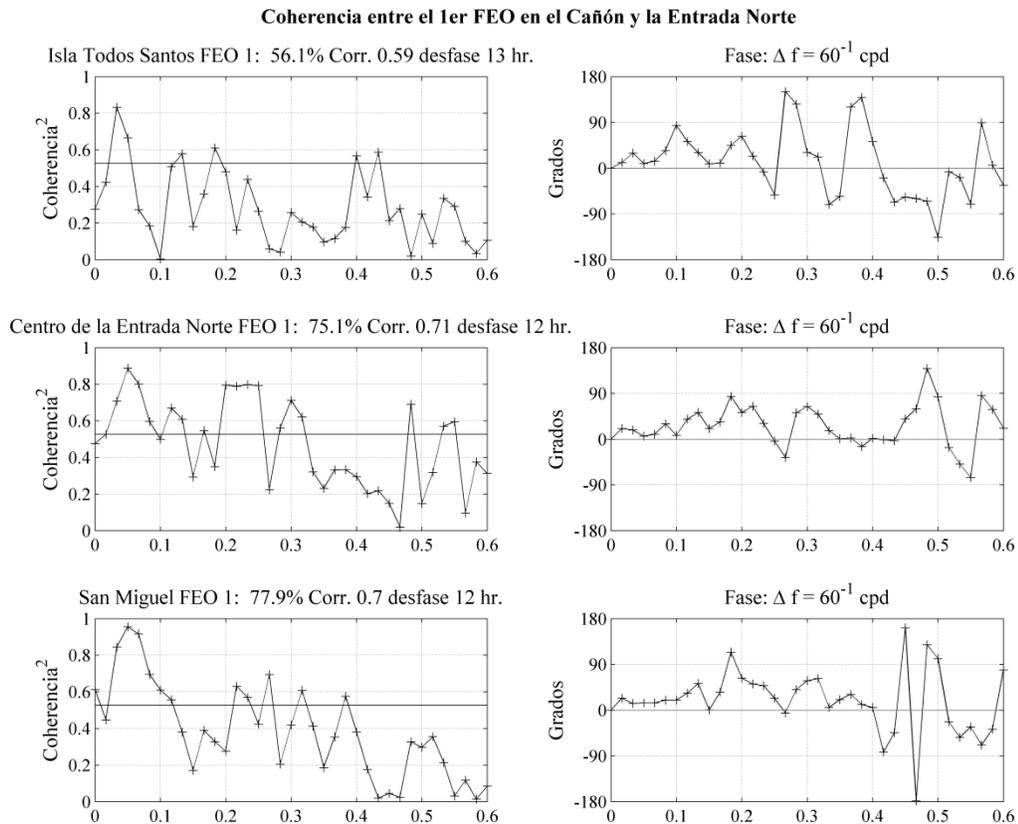


Figura 14 Coherencias y fases entre la serie de tiempo del primer FEO del cañón y las series de tiempo del primer FEO de los anclajes de la EN. De arriba a abajo están las coherencias para los anclajes de la ITS, CEN y SM, respectivamente. Las fases positivas indican que las corrientes en la cañón anteceden a las corrientes en la entrada norte. La línea horizontal indica las coherencias mínimas que son significativamente distintas de cero al 95% de confianza.

Para apoyar y explorar más la relación entre las corrientes en el cañón y las corrientes en la EN, se calculó la coherencia entre el componente de la velocidad transversal a la entrada norte (EN) para los anclajes del centro de la entrada norte (CEN) y San Miguel (SM) con todas las profundidades de la componente de la velocidad transversal al cañón; en la EN se tomaron el componente a -30° (positiva entrando a la bahía), en el cañón se tomaron las componentes a -135° (positiva saliendo de la bahía). En la figura 15 se muestran las coherencias para las bandas de $1/20$ y $1/15$ cpd. Se encontró una alta coherencia entre las corrientes cercanas a la superficie en el cañón con las corrientes a todas las profundidades tanto del CEN como de SM en la banda de $1/20$ cpd (figura 15 A y C).

Asimismo, se encontró que las corrientes entre 100 y 200 m de profundidad en el cañón son coherentes con las corrientes en la EN para las mismas frecuencias, sin embargo entre los 75 y 100 m de profundidad las corrientes del cañón no son coherentes con las corrientes en la EN. Para la banda de 1/15 cpd es mayor la coherencia que hay entre las corrientes subsuperficiales del cañón (~150 m) con las corrientes de la EN a casi todas las profundidades, que la coherencia de las corrientes las corrientes superficiales del cañón con las corrientes en la EN (figura 15 B y D).

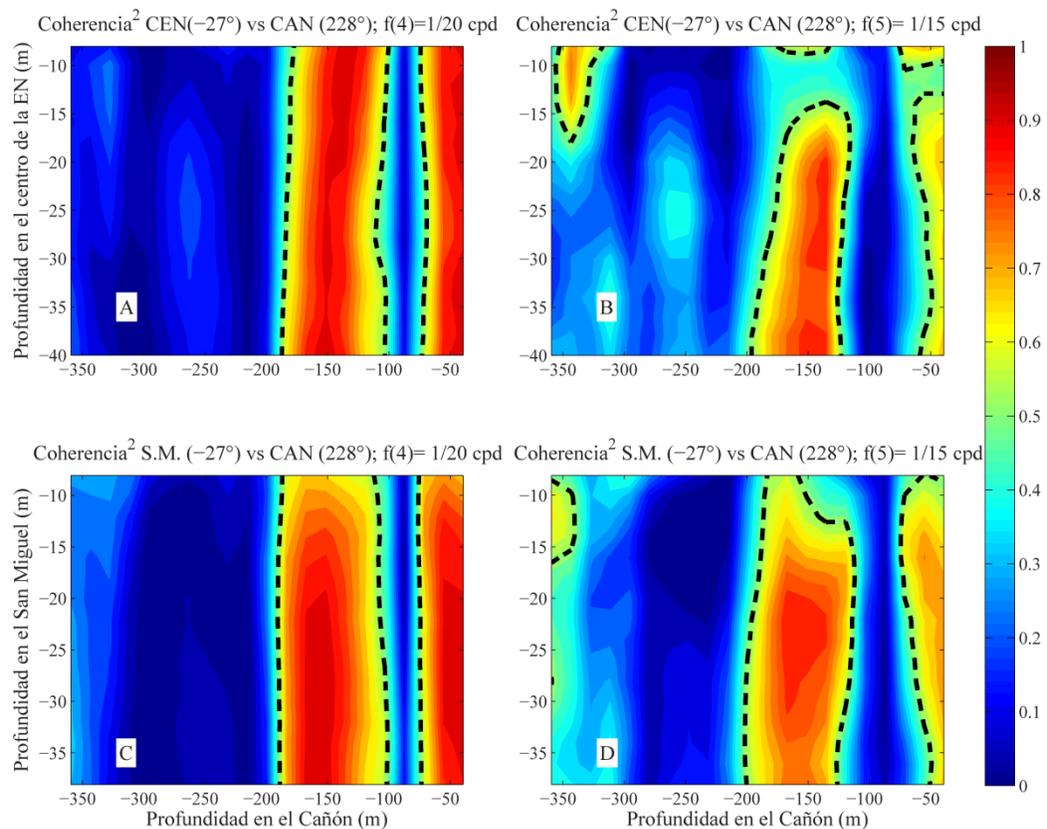


Figura 15 Coherencias entre las corrientes entrando a la bahía (-30°) a todas las profundidades de los anclajes del centro de la entrada norte (CEN) y San Miguel (SM) y las corrientes saliendo de la bahía (-135°) a todas las profundidades en el anclaje del cañón. Se muestran las coherencias para las bandas de 1/20 y 1/15 cpd para el CEN (A y B) y para SM (C y D), respectivamente. Las líneas punteadas negras indican las regiones donde la coherencia es significativa con un 95% de confianza. Ancho de banda: 1/60 cpd.

Para investigar aún más la relación entre las corrientes de ambas entradas de la bahía, se buscó la relación entre las corrientes en el cañón y la presión subsuperficial al interior de la Bahía de Todos Santos. Los datos del sensor de presión instalado en Punta Banda que fue colocado a una profundidad media de 14 m refleja los efectos superficiales de las anomalías de la presión. Sin embargo, esta serie de datos no es lo suficientemente larga para calcular coherencias entre las corrientes del cañón y la presión al interior de la bahía. El sensor en el anclaje San Miguel en la entrada norte provee de una serie más larga de datos de presión a 40 m de profundidad. Se compararon las series filtradas de presión de Punta Banda y la de San Miguel y se encontró que a frecuencias menores de 1 cpd las series están bien correlacionadas (0.93) y por lo tanto los efectos baroclínicos en la serie de presión a 40 m y los movimientos verticales del anclaje son despreciables (figura 16).

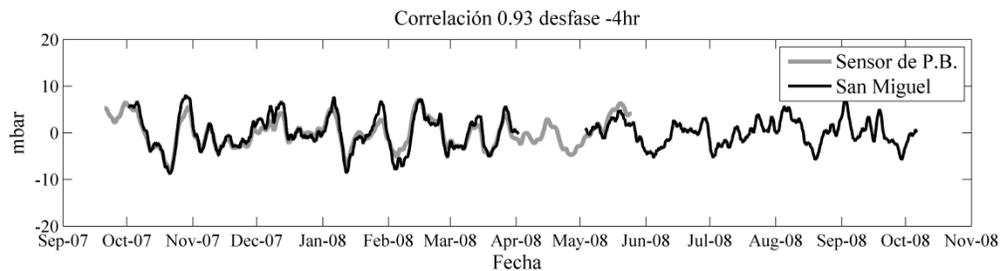


Figura 16 Series de tiempo y correlación de la presión subsuperficial del sensor de Punta Banda y la presión en San Miguel cerca del fondo a 40 m

Se calculó la coherencia entre la serie de tiempo del primer FEO del cañón y la presión subsuperficial en los anclajes de la entrada norte. El anclaje de San Miguel fue el que presentó una mayor coherencia entre estas dos variables, siendo máxima en las banda de 1/20 y 1/15 cpd con valores cercanos a 0.8 y significativo hasta la banda de 1/12 cpd. La banda de 1/7.5 cpd también resultó estadísticamente significativa (figura 17). Para todas las frecuencias donde la coherencia resultó significativa la fase se mantuvo cercana a 90°. Dada la estructura del primer FEO del cañón (figura 11) esta fase indica que las corrientes cañón arriba por debajo de los 100 m de profundidad anteceden a un mínimo de presión en el anclaje de SM. La presión cercana al fondo en los anclajes de ITS y CB presentó un comportamiento similar en relación a la serie de tiempo del primer FEO del cañón.

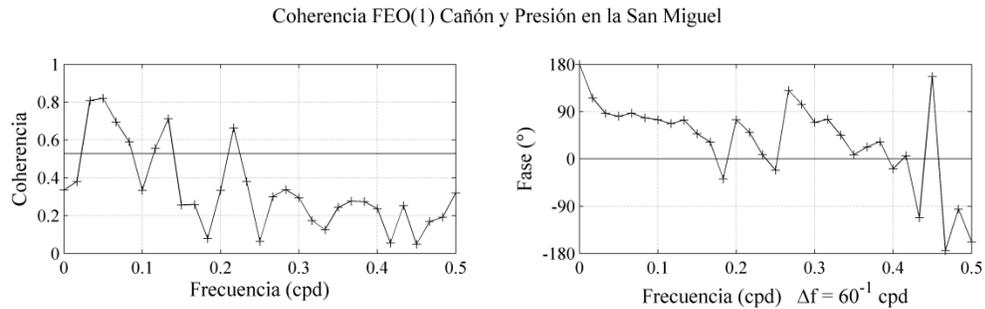


Figura 17 Coherencia y fase entre la serie de tiempo del primer FEO del cañón y la presión subsuperficial en el anclaje de SM. Las fases positivas indican que las corrientes cañón abajo anteceden a un máximo de las anomalías de presión. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.

Se calculó la densidad espectral de las series de tiempo del primer modo empírico de los anclajes de San Miguel y del cañón, ambas series tienen una distribución energética similar (figura 18). Ambos espectros tienen una de las bandas más energéticas a 1/20 cpd y picos similares a 1/3.3 cpd.

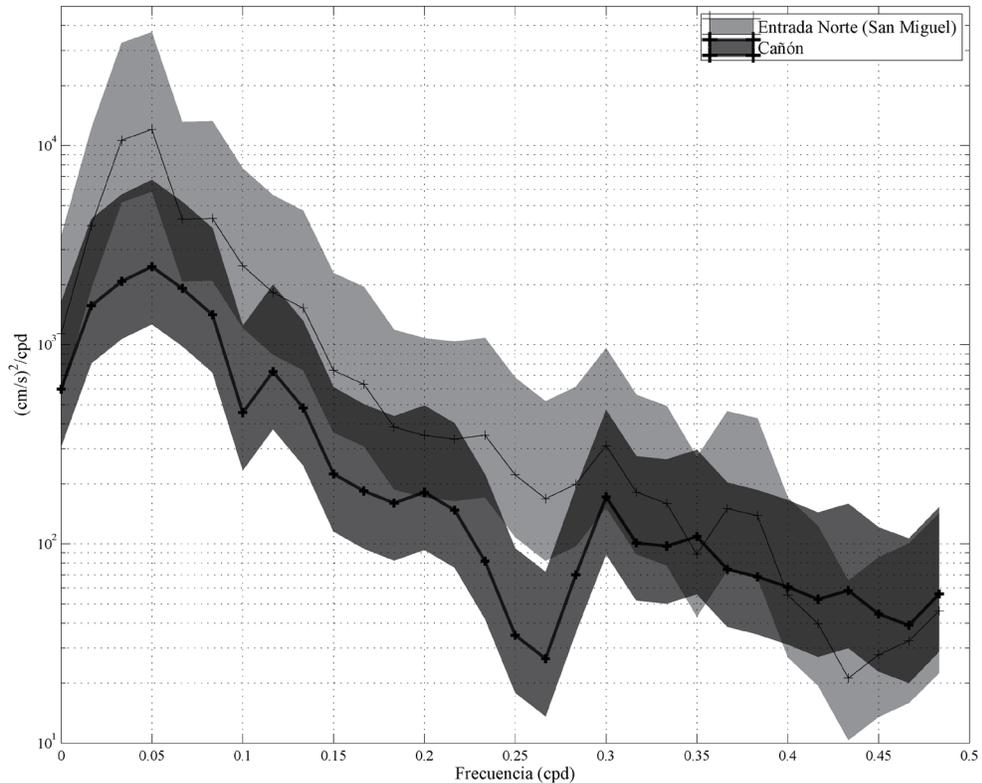


Figura 18. Densidad espectral de la serie de tiempo del primer FEO de las corrientes en El Cañón de Punta Banda (gris oscuro) y para el anclaje de San Miguel (gris claro). Las áreas sombreadas indican el nivel de confianza al 95%

La fuerza del gradiente de presión (FGP) a lo largo de la costa estimada entre Santa Rosaliita (SR) y San Diego (SD) se consideró positiva hacia el norte, es decir anomalías positivas indican un nivel del mar mayor en SR que en SD y viceversa. Se comparó la FGP con la serie de tiempo del primer FEO en el cañón. Se encontró que la coherencia es estadísticamente significativa desde 1/20 hasta 1/7.5 cpd con un valor máximo de 0.8; la

fase en este intervalo de frecuencia va desde poco menos de 90° en la banda de $1/20$ cpd y decrece hasta 45° en la banda de $1/7.5$ cpd (figura 19).

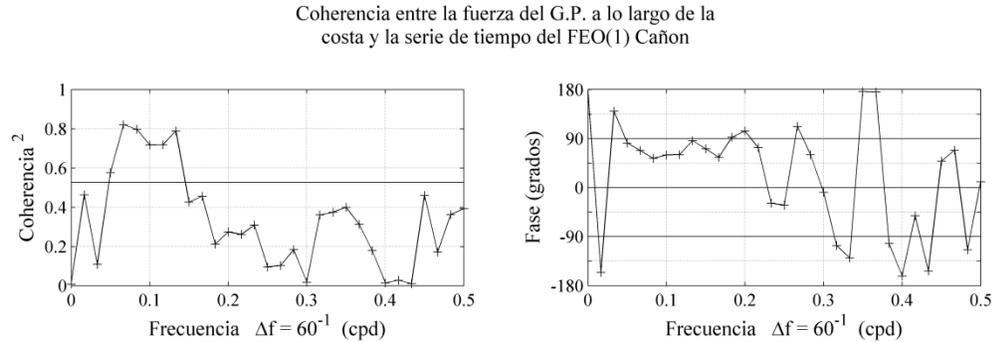


Figura 19 Coherencia entre la fuerza del gradiente de presión entre Santa Rosaliita y San Diego y la serie de tiempo del primer FEO de las corrientes en el cañon. Las fases positivas indican que la FGP antecede a corrientes hacia el norte en la superficie y a corrientes cañon abajo por debajo de los 100 m. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.

Para entender mejor la relación entre la FGP y las corrientes en el cañon se seleccionaron las corrientes a lo largo del cañon (45° respecto al este) a 40 y 150 m de profundidad; velocidades positivas indican corrientes cañon arriba. Se calculó la coherencia entre la FGP y las corrientes seleccionadas. Las coherencias fueron significativas desde $1/15$ hasta $1/7.5$ cpd para ambas profundidades seleccionadas. A los 40 m la máxima coherencia fue de 0.85, las fases indican que anomalías positivas del gradiente de presión anteceden entre 60° y 120° a las corrientes cañon arriba a esta profundidad. Las series de la FGP y las corrientes a 150 m muestran coherencias a las mismas frecuencias que a 40 m con valores máximos de hasta 0.67, la principal diferencia es que a esta profundidad las fases a las frecuencias donde se presentan coherencias significativas son negativas por lo que anomalías negativas (positivas) de la FGP anteceden a corrientes cañon arriba (abajo) entre 90° y 135° a esta profundidad (figura 20).

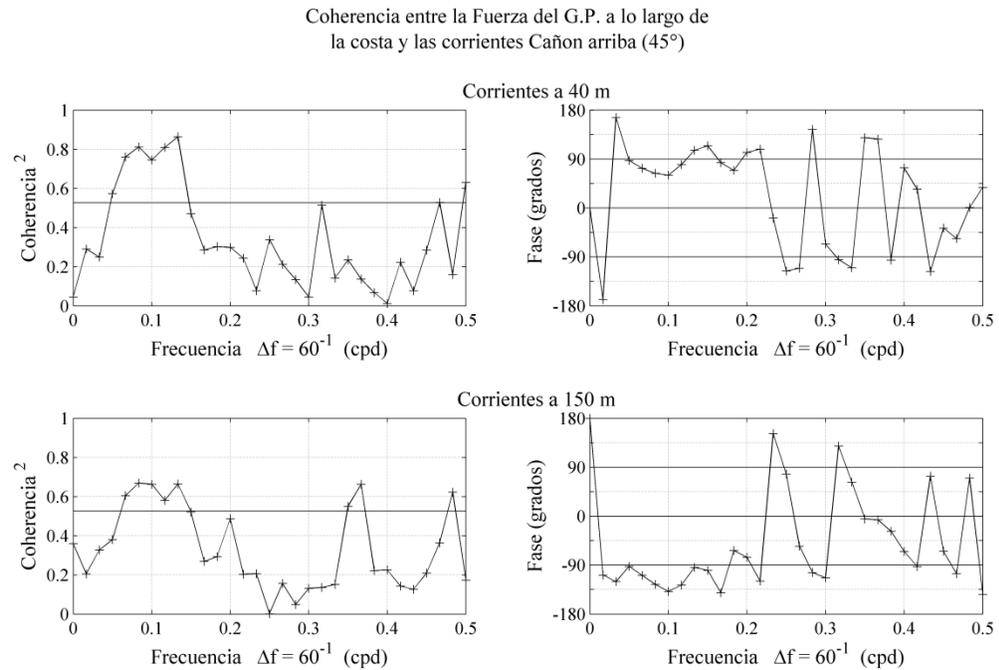


Figura 20 Coherencia y fase entre la fuerza del gradiente de presión (FGP) entre Santa Rosaliita y San Diego con el componente a 45° de las corrientes en el cañón a 40 m (paneles superiores), y a 150 m (paneles inferiores). Las fases positivas indican que anomalías positivas en la FGP antecede a corrientes cañon arriba (entrando a la bahía). La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.

Se calcularon los FEOs de la aceleración local a lo largo de la costa (116° respecto al este) en el anclaje de Punta Banda Exterior, el primer FEO explica el 33% de la varianza de la aceleración en ese anclaje y su estructura vertical se muestra en la figura 21-A, esta tiene un máximo subsuperficial a los 170 m que llega hasta un poco más que $0.8 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-2}$. La distribución vertical de la varianza explicada también tiene un máximo subsuperficial, solo que este está centrado alrededor de los 200 m (figura 21-B).

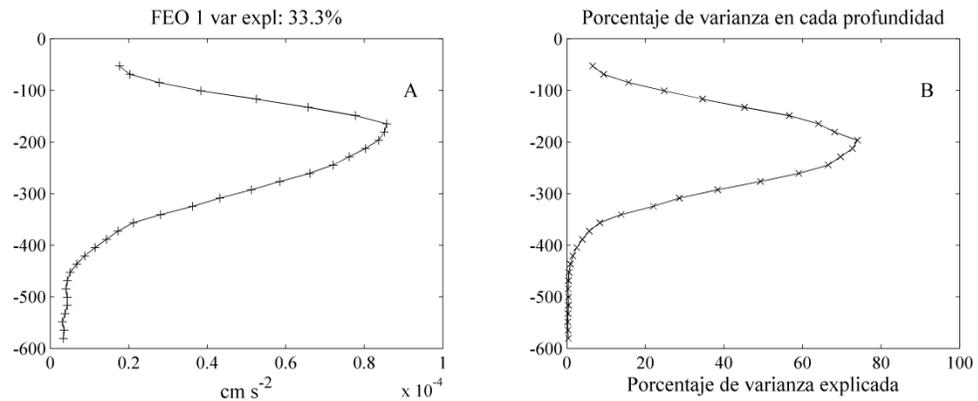


Figura 21(A) Estructura vertical del primer modo empírico del componente a 116° de la aceleración en Punta Banda exterior, el porcentaje de varianza total explicada por este modo es de 33.3%. (B) Porcentaje de la varianza explicada por este modo a cada una de las profundidades.

Se calculó la coherencia entre la fuerza del gradiente de presión a lo largo de la costa y la serie de tiempo del primer FEO de la aceleración en PBE, se encontró que las series son significativamente coherentes en las bandas de 1/15 y 1/12 cpd. Anomalías positivas de la FGP anteceden a aceleraciones hacia el norte en PBE con fases de 30° y 14° respectivamente en las bandas mencionadas (figura 22).

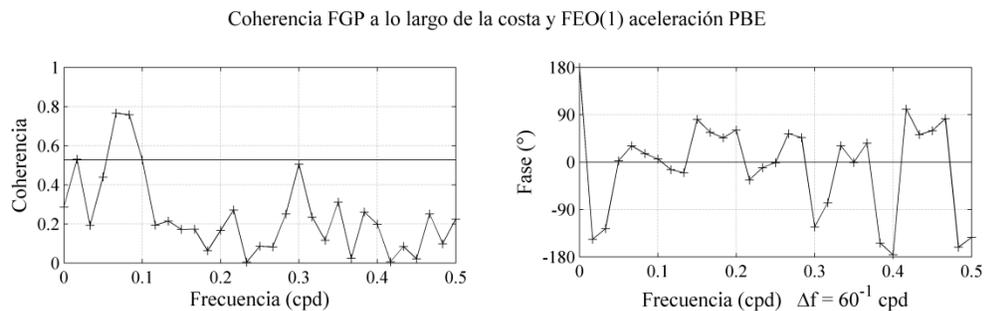


Figura 22 Coherencia entre la fuerza del gradiente de presión (FGP) entre Santa Rosalita y San Diego y la serie de tiempo del primer FEO de las aceleraciones a lo largo de la costa en PBE (figura 21). Las fases positivas indican que la FGP antecede a aceleraciones hacia el norte en PBE. La línea horizontal en las coherencias indica los valores mínimos que son significativamente distintos de cero al 95% de confianza.

3.6 Datos Hidrográficos

Se obtuvieron datos de CTD a partir de lances hidrográficos realizados en enero 18, abril 6 y agosto 16 del año 2008. En la figura 23 se señalan las posiciones geográficas donde se realizaron los lances y se indican los lances que forman la línea E2.

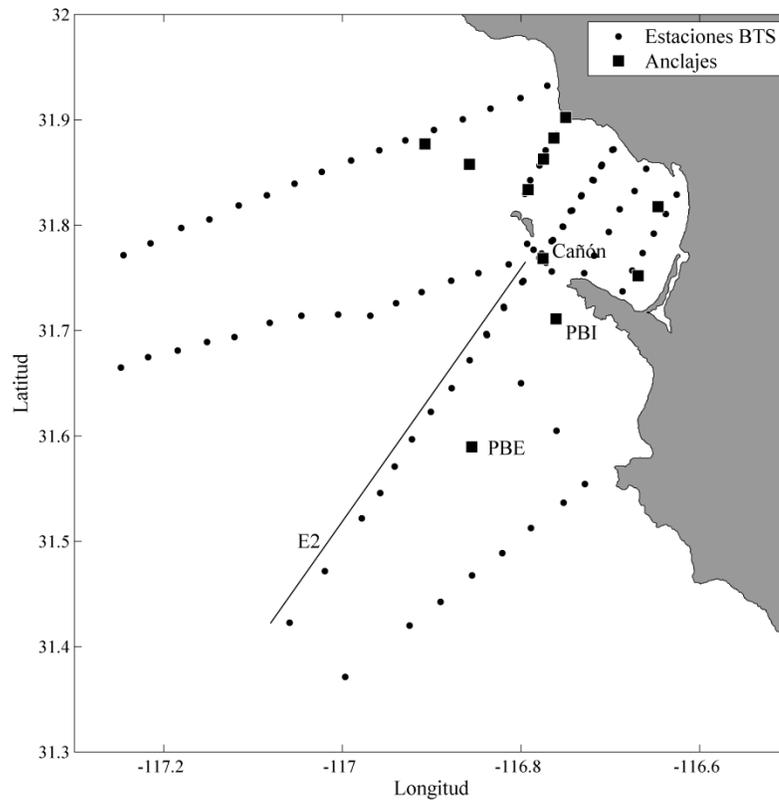


Figura 23 Mapa de estaciones donde se realizaron lances hidrográficos en la campaña de abril-2008 (●). Se sobreponen la localización de los anclajes de ADCP (■). Se indica la línea de estaciones E2 que se utilizaron para la figura 24.

La línea E2 está constituida por 13 lances desde el centro de la entrada del cañón hasta unos 50 Km mar afuera en dirección perpendicular a la entrada. Sobre esta línea se graficó la sección vertical de salinidad con los lances realizados en abril del 2008. En este transecto se encontraron valores máximos de salinidad de 34.35 a unos 16 Km alejado de la entrada de la BTS y a unos 300 m de profundidad. Las isohalinas suben desde mar afuera conforme se acercan a este máximo, decrecen en los 16 Km más cercanos a la costa por

debajo de la haloclina y se elevan en la superficie (figura 24). Este máximo de salinidad esta sobre la isobata de los 600 m de profundidad, sobre el talud de una península sumergida (véase figura 1). El núcleo de máxima salinidad es más profundo que la profundidad donde se encuentra el máximo de velocidad a lo largo de la costa en PBE (véase figura 6).

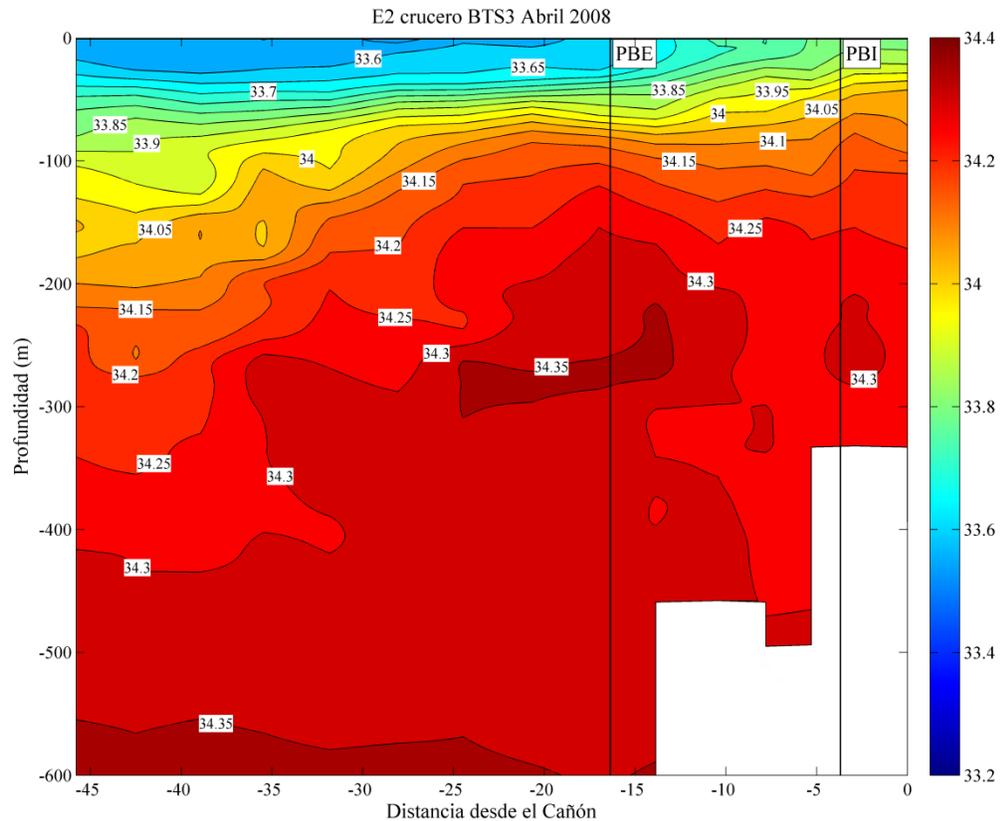


Figura 24 Sección de salinidad a partir de lances de CTD en la línea E2 durante el crucero del 6 de abril del 2008. Las líneas verticales indican la posición más cercana al transecto de los anclajes de Punta Banda Exterior y Punta Banda Interior.

Se buscó evidencia de la presencia de aguas con características de la contracorriente subsuperficial en las inmediaciones del anclaje de PBE. Para ello se graficó el perfil de corrientes promediadas durante 30 días en PBE a lo largo de la costa y el perfil de las propiedades de temperatura, densidad y salinidad del lance hidrográfico más cercano a la posición del anclaje en los tres cruceros (figura 25). Se encontró que las máximas velocidades subsuperficiales se presentaron durante agosto cuando la termoclina, pycnoclina y haloclina estaban más marcadas. En los paneles de la figura 25, las barras verticales indican la masa de agua característica del núcleo de la contracorriente subsuperficial descritas por Gay y Chereskin (2009) para la zona del sur de California y por Linacre *et al.* (2010) para la zona de Ensenada. Para las tres variables hidrográficas en verano, y para la temperatura y la densidad en primavera, el núcleo de la corriente tiende a estar más somero que para los valores reportados por Gay y Chereskin (2009) y Linacre *et al.* (2010). Para invierno, la corriente es mucho más débil y parece estar centrada a mayor profundidad alrededor de los 250 m. En este caso, la corriente parece estar un poco más profunda que los valores hidrográficos típicos para el núcleo de la contracorriente subsuperficial que citan los autores antes mencionados.

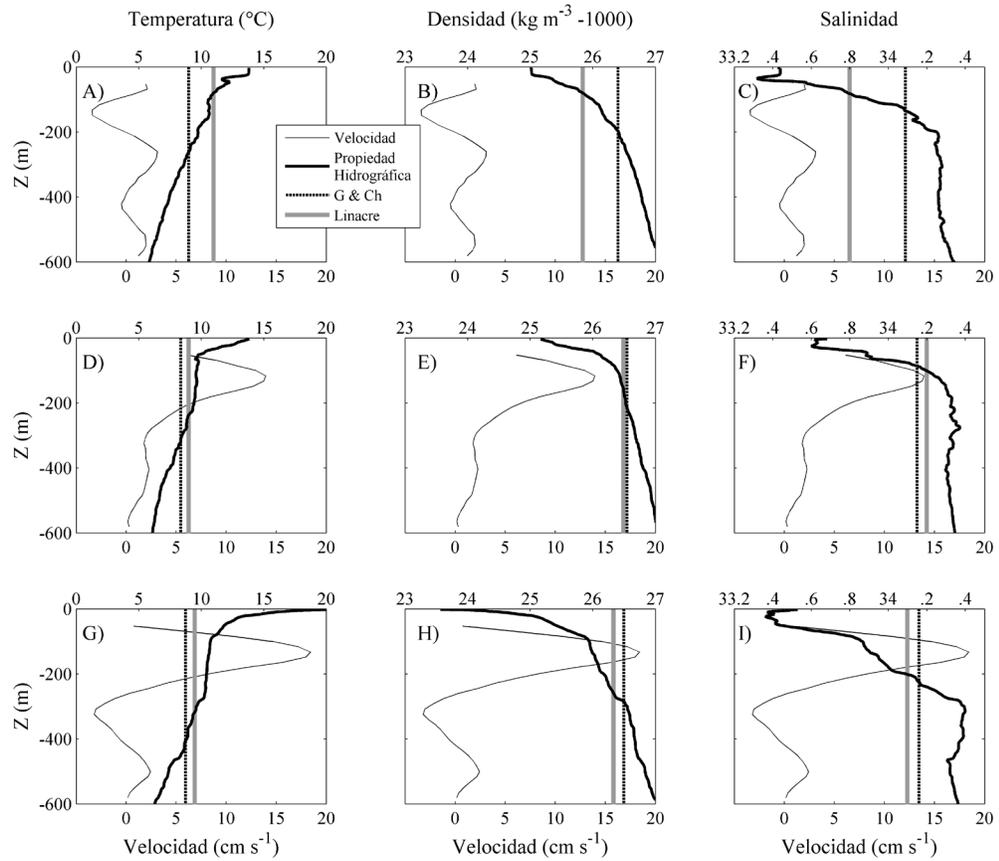


Figura 25 Perfiles de CTD de temperatura (A, D, G), densidad (B, E, H), Salinidad (C, F, I), más cercanos al anclaje de Punta Banda Exterior (PBE) para los cruceros de Enero 18 (A, B, C), Abril-6, (D, E, F), Agosto-16 (G, H, I). Se sobrepone el perfil promedio de 30 días de la componente de la velocidad a lo largo de la costa (116°) en PBE centrado alrededor de la fecha del crucero. Las líneas verticales indican los valores de las propiedades hidrográficas para el núcleo de la contracorriente subsuperficial según Gay y Chereskin (2009) y Linacre *et al* (2010).

Capítulo 4

Discusión

Han sido muy pocas las observaciones directas y de largo periodo de las corrientes en la Bahía de Todos Santos. Este trabajo representa el primer estudio de largo periodo de las corrientes en las entradas de la Bahía de Todos Santos. En esta sección primero se investiga el efecto del esfuerzo del viento sobre las corrientes. Posteriormente se discute sobre los forzantes de las corrientes observadas y se compara con estudios previos. Primeramente se analiza la relación entre las corrientes de la entrada norte (EN) con las corrientes superficiales y a 150 m en el cañón, aquí se propone un modelo conceptual del posible fenómeno que se presenta. A continuación se discute la corriente subsuperficial en Punta Banda y sus propiedades hidrográficas. Por último se analiza la relación de las corrientes en Punta Banda Exterior y el cañón con el gradiente de presión a lo largo de la costa entre Santa Rosalita y San Diego.

4.1 Relación entre el esfuerzo del viento y las corrientes en la entrada norte.

Los primeros estudios de las corrientes en la Bahía de Todos Santos efectuados con trazadores lagrangeanos indicaban una posible influencia del viento en la circulación al interior de la bahía (Álvarez *et al*, 1988; Durazo y Álvarez, 1988). Algunos autores encontraron semejanzas entre los resultados de modelos numéricos bidimensionales forzados por vientos y los patrones de circulación encontrados con los trazadores lagrangeanos. Considerando que el viento predominante en la bahía proviene del noroeste (Álvarez, 1971) era de esperarse que el viento tuviera una influencia importante al menos en los anclajes someros al interior de la bahía, pero solo se encontró relación en la EN y en las mediciones más superficiales del cañón. La relación que se encontró fue débil, solamente en una o dos bandas de frecuencia en 1/6 y/o 1/5 cpd. La consistencia de esta relación a estas frecuencias en tres anclajes en la EN y en el cañón y que el esfuerzo del viento anteceda a las corrientes (figura 10) sugieren que el viento está forzando a las

corrientes a esta frecuencia. Las variaciones en la fase puede ser un indicador de que otros factores involucrados en la variabilidad de las corrientes. Barton (1985) usando mediciones de corrientes en un anclaje cercano a la Isla Todos Santos en la EN tampoco encontró una relación fuerte entre el viento y las corrientes, esto se lo atribuyó a que la topografía de la bahía y que los vientos fueron débiles en comparación a otras regiones donde si se encontró una relación fuerte entre el viento y las corrientes superficiales. Mateos (2010) usando un modelo numérico tridimensional determinó que el viento tiene influencia en las corrientes que ingresan por la EN pero que las corrientes externas también juegan un papel importante en la circulación. Respecto a los anclajes externos, la falta de relación entre el viento y las corrientes se puede deber a que dicha relación se da con corrientes más cercanas a la superficie que las que se pudieron medir en esos anclajes o bien a las mismas causas que señaló Barton (1985).

4.2 Relación entre las corrientes de la entrada norte y las corrientes en el cañón.

La estructura vertical de las fluctuaciones de la corriente en la EN puede considerarse primordialmente barotrópica, es decir que las corrientes son aproximadamente uniformes en dirección y magnitud a lo largo de toda la columna de agua. Esto se ve reflejado en que la estructura espacial del primer FEO de las corrientes de la EN es barotrópica. La varianza que representa el primer FEO es mayor del 70% en los anclajes de SM y CEN (figura 12) y del 56% en la ITS. Los espectros rotacionales de las corrientes en la EN también reflejan el carácter barotrópico de las corrientes, donde la distribución de la energía en las bandas más importantes es independiente de la profundidad (figura 9-A). Esta distribución vertical uniforme de las corrientes puede deberse a que la estratificación en la BTS es estacional y con una termoclina posiblemente muy somera, lo cual podría no favorecer fenómenos baroclínicos de baja frecuencia. Además, permite establecer que la serie de tiempo del primer FEO es representativa de la variabilidad de toda la columna de agua.

En un cuerpo de agua costero semicerrado donde los aportes fluviales no son significantes respecto al volumen de la cuenca, es de esperarse que exista conservación de masa a través de sus entradas y con ello que las corrientes perpendiculares en las entradas estén bien correlacionadas. En el caso de la BTS las oscilaciones de la velocidad perpendicular en la entrada norte (EN) están bien correlacionadas con las oscilaciones de la velocidad a ciertas profundidades en el cañón, tanto en los modos empíricos ortogonales (véase figura 14) como en las componentes perpendiculares a las entradas (véase figura 15). El FEO del cañón explica más varianza en los puntos más cercanos a la superficie y alrededor de 150 m, por lo que son estas profundidades donde está mejor relacionado con los FEOs en la EN. Esto también se ve reflejado en las coherencias entre las componentes perpendiculares a las entradas; la figura 15 muestra que la mejor coherencia se da cerca de la superficie (~ 40) y alrededor de los 150 m tanto en San Miguel como en el centro de la entrada norte. Debido a la estratificación del océano, es de esperarse esta dependencia entre las velocidades medidas en toda la vertical de los anclajes de la EN (debido a su carácter barotrópico) con las mediciones de velocidad hechas a profundidades similares en el cañón, es decir entre los primeros 50 metros del anclaje. A esta profundidad, los flujos que entran (salen) por la EN están relacionados con flujos que salen (entran) por el cañón, con un desfase cercano a cero mientras que las corrientes cañón arriba (abajo) a 150 m de profundidad están relacionadas con corrientes que entran (salen) de la BTS por la EN (figura 15, las fases están a 0° en la superficie y a 180° en 150 m del cañón). La relación entre las corrientes de la EN y las corrientes a 150 m en el cañón no pueden deberse a una continuidad de flujo entre estas dos localidades, ya que, en general, la bahía y la EN tienen menos de 50 metros de profundidad y debido a la propia estratificación del océano es difícil que el agua suba o se hunda entre los 50 m de la EN y los 150 m en el cañón donde se encontró relación. La densidad espectral de las series de tiempo de los FEOs en San Miguel y el cañón muestran que tienen una distribución similar (figura 18) y que además la mayor energía se da en las bandas de $1/30$ y $1/20$ cpd, donde estos dos anclajes son coherentes.

La presión subsuperficial (PSS) en SM a 40 m de profundidad resulta casi idéntica que la presión en Punta Banda (PB) medida aproximadamente a 14 m de profundidad a las

frecuencias de interés, por lo que a 40 m de profundidad en SM (figura 16) las variaciones de la PSS se deben a variaciones del nivel del mar. Las serie de tiempo del primer FEO del cañón y las anomalías de presión en SM tienen coherencias significativas principalmente en las bandas de 1/30 y 1/20 cpd con fases cercanas a los 90° (un cuarto de ciclo), esto indica que corrientes cañón abajo a 150 m anteceden a un máximo de PSS en SM y a su vez que las corrientes superficiales que ingresan a la BTS por el cañón anteceden a un máximo de PSS.

En la figura 26 se propone un modelo conceptual de cómo pueden estar relacionadas las corrientes a 150 m en el cañón, las corrientes perpendiculares a la sección de la EN y el nivel del mar en la BTS. Lo que se propone es que la BTS y el cañón están dentro de un sistema de dos capas, donde la capa superficial tiene un espesor de más de 50 m, por lo que la mayor parte de la BTS y toda la EN están dentro de la primera capa. Forzamientos externos inducen movimientos baroclínicos, donde corrientes a 150 m se mueven en sentido contrario a corrientes superficiales en el cañón. Debido a la pendiente de la batimetría, las corrientes cañón arriba (pendiente arriba) a 150 m fuerzan una elevación de la pycnoclina. El máximo de elevación de la pycnoclina se dará hasta que las corrientes cañón arriba cesen de fluir en esa dirección, es decir, un cuarto de ciclo después del máximo de velocidad en esa dirección. Si suponemos que la respuesta en el cañón es baroclínica, como sugieren las fluctuaciones de la corriente perpendicular a la sección, entonces la elevación de la pycnoclina generará una disminución del nivel del mar cuyo mínimo ocurrirá también un cuarto de ciclo después del máximo de la velocidad cañón arriba a 150 m de profundidad. Esto explicaría el desfase que se observa entre las corrientes a 150 m en el cañón y la PSS en SM (véase figura 17) y en Punta Banda. Como supusimos que toda la BTS por arriba de unos 50 m está en la primera capa, eso explicaría que la respuesta de las corrientes en la EN sea aproximadamente independiente de la profundidad, tal y como se observa en la figura 12. Un modelo similar al descrito anteriormente, pero para oscilaciones de alta frecuencia (mareas y seiches) fue propuesto por Chapman y Giese (1990) para explicar las oscilaciones de corrientes y nivel del mar en la plataforma continental inducidas por la marea interna sobre la pendiente continental.

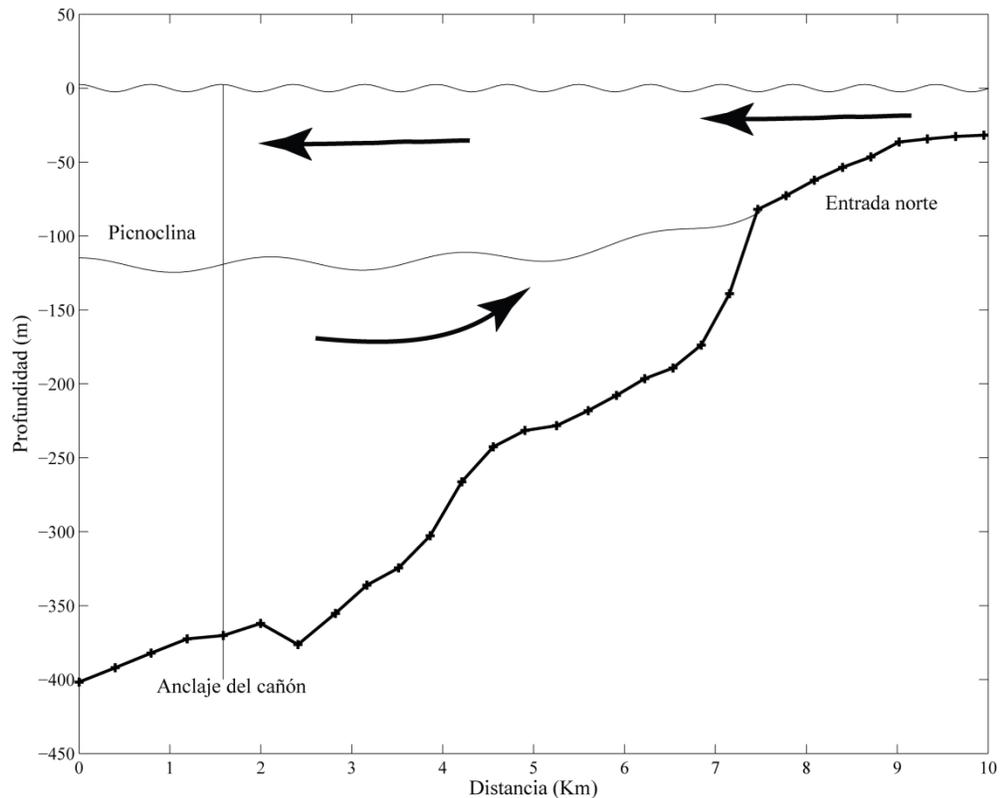


Figura 26 Esquema conceptual de la relación entre las corrientes a 150 m en el cañón y las corrientes en la EN. Se muestra el perfil de batimetría en una sección a lo largo del cañón, la línea vertical indica la posición relativa del anclaje del cañón. La línea ondulada debajo de los 100 m de profundidad representa la pinoquina.

Se puede hacer una estimación de la velocidad vertical (W) en el fondo del cañón considerando únicamente la condición de frontera de impenetrabilidad y usando las velocidades horizontales con la ecuación $W = U\alpha$, donde U es una medida típica de la velocidad horizontal a lo largo del cañón y α es la pendiente del fondo del cañón. Al considerar la desviación estándar de la velocidad perpendicular al cañón ($\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$), podemos suponer una escala típica de las fluctuaciones de la velocidad horizontal de 1 cm s^{-1} para las frecuencias de interés. Una pendiente promedio del cañón es de 0.03 y por lo tanto podemos estimar una escala para la velocidad vertical del orden de unos 25 m día^{-1} . Esta velocidad probablemente está sobreestimada pero es una muestra de que la topografía del cañón puede inducir movimientos verticales de magnitud considerable incluso para velocidades horizontales relativamente modestas.

Usando datos de un anclaje de 7 sensores de temperatura (microcats) colocado en el cañón durante 2010-2011, se estimaron excursiones verticales de algunas isoterms. El anclaje se colocó aproximadamente en la misma posición que el anclaje de corrientes utilizado en este trabajo. La isoterma de 10° C, por ejemplo, tiene excursiones de baja frecuencia que alcanzan los 100 m, una profundidad promedio de 140 m y una desviación estándar de unos 25 m (figura 27). Claramente, las oscilaciones de baja frecuencia de las isoterms en el cañón parecen alcanzar magnitudes considerables a pesar de las velocidades horizontales relativamente bajas. Nótese que estas oscilaciones de gran amplitud también son consistentes con el mayor contenido energético de las corrientes horizontales alrededor de 150 m de profundidad en el cañón (figura 9-B).

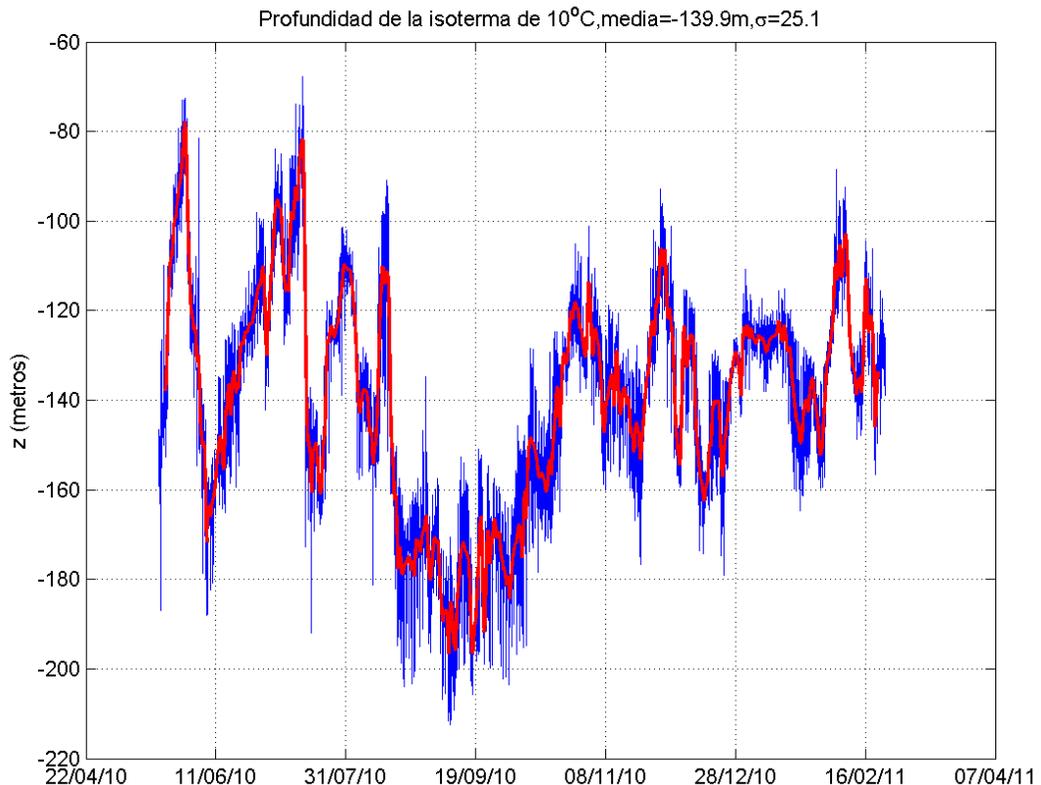


Figura 27 Profundidad de la isoterma de 10°C en el cañón de abril del 2010 hasta febrero del 2011. La curva roja es la serie filtrada para eliminar mareas y oscilaciones inerciales.

4.3 Gradiente de presión a lo largo de la costa.

La fuerza del gradiente de presión a lo largo de la costa (FGP) puede ser uno de los términos de la ecuación de momento a lo largo de la costa que esté asociado a las fluctuaciones de velocidad observadas. La FGP estimada a lo largo de la costa entre Santa Rosalita y San Diego tiene una buena relación con las corrientes perpendiculares al cañón. En el cálculo de coherencia entre la FGP y la serie de tiempo del primer FEO del cañón (figura 19), muestra que existe una buena coherencia entre estas dos variables a las frecuencias desde 1/15 cpd hasta 1/7.5 cpd, las fases indican que la FGP antecede por un cuarto de ciclo la serie de tiempo del FEO, y considerando la estructura vertical de éste último, se puede afirmar que anomalías positivas de la FGP anteceden por un cuarto de ciclo a corrientes entrando al cañón cerca de la superficie, y a corrientes cañón abajo a los 150 m de profundidad. Esto se puede observar más claramente al comparar la FGP directamente con las velocidades en el cañón (figura 20). Cerca de la superficie la coherencia entre estas dos series es alta y significativa para las mismas bandas que en el FEO, la fase indica que la FGP antecede por 90° a las corrientes ingresando a la bahía. A 150 m la coherencia no es tan alta como en la superficie aunque, sí es significativa. La coherencia entre la FGP, tanto con las serie del FEO, como directamente con las corrientes, establece que a las bandas de frecuencia donde es significativo, la FGP puede ser un término importante asociado a la generación de corrientes a lo largo del cañón. Dado que las variaciones de la FGP a lo largo de la costa pueden estar asociadas a ondas atrapadas a la costa, estas pueden ser las causantes de las oscilaciones de las corrientes en el cañón. La fase de las coherencias es difícil de interpretar ya que el balance no es necesariamente nada más geostrófico (entre el FGP y la velocidad perpendicular al cañón), sino que muy probablemente hay otros términos de importancia como la aceleración local y la fricción. En el caso de ondas atrapadas a la costa, por lo menos la aceleración local a lo largo de la costa es de importancia.

Teorías sobre la corriente subsuperficial hacia el polo han determinado que el gradiente de presión a lo largo de la costa es un término esencial para la generación de dicha corriente (McCreary, 1981). Por lo tanto, es de esperarse que las fluctuaciones del gradiente de presión también tengan importancia en las fluctuaciones de la corriente subsuperficial. Se encontró que la FGP tiene relación con la componente a lo largo de la costa de la aceleración local en el anclaje de PBE (figura 22) en las bandas de frecuencia de $1/15$ y $1/12$ cpd donde anomalías positivas de la FGP, es decir con dirección hacia el polo, están casi en fase con las aceleraciones hacia el polo. Esta relación indica que la corriente se acelera en respuesta al gradiente de presión para las bandas de frecuencia antes mencionadas. El primer FEO de la aceleración explica la mayor cantidad de varianza de esta serie alrededor de los 170 m (figura 21-B) por lo que la FGP está en su mayor parte relacionada con fluctuaciones de la contracorriente subsuperficial.

4.4 Presencia de la Contracorriente Subsuperficial.

Las corriente promedio en PBE mostró una dirección hacia el polo en toda la columna de agua con mayores intensidades entre los 100 y 200 m de hasta 13 cm s^{-1} (figura 5). En este anclaje fueron escasos los eventos donde se observó corrientes hacia el ecuador siendo predominante la dirección hacia el polo, hubo eventos de intensificación de la corriente hacia el norte donde alcanzó velocidades de hasta 30 cm s^{-1} . En base a las mediciones realizadas puede considerarse que existe una corriente permanente hacia el polo en la localidad de PBE que se extiende desde por lo menos 50 m hasta 600 m de profundidad, esta corriente es muy posiblemente la Contracorriente Subsuperficial (CSS). La CSS es una corriente casi permanente con dirección al polo confinada al borde continental, su núcleo frente a Baja California se encuentra entre 150 y 600 m de profundidad (Wooster y Jones, 1970; Lynn y Simpson, 1987; Barton y Argote, 1980). Esta corriente ha sido observada en varios puntos frente a Baja California (v. gr. Linacre *et al.*, 2010) y California, (v. gr., Chelton, 1984). Wooster y Jones (1970) frente a Punta Colonet (100 Km al sur de la BTS) encontraron que en esta zona tiene magnitudes de hasta 40 cm s^{-1} , y que está asociada a un núcleo de mayor salinidad (> 34.3) y de temperaturas entre los 8° y 11° C . Collins *et al* (2000) observaron la presencia del núcleo de la CSS en la Bahía de Monterey a 120 m de profundidad y a 25 Km de la costa con velocidades a lo largo de la costa promedio máximas de 10 cm s^{-1} . Gay y Chereskin (2009) en un estudio más reciente en el sur de California usando datos de perfiladores acústicos montados en barco y lances hidrográficos recopilados durante 10 años, encontraron que la CSS es más débil solamente en primavera y que durante el invierno y primavera su núcleo es más profundo (290 y 245 m respectivamente), mientras que en verano y otoño es más somero, llegando a los 196 y 170 m, respectivamente. Los datos en esta investigación muestran que las mayores intensidades de la CSS se dieron en verano-otoño coincidiendo con lo reportado por Gay y Chereskin (2009).

Linacre *et al.* (2010) usando análisis armónico con la frecuencia anual sobre datos de cruceros oceanográficos realizados hasta cuatro veces al año desde 1998 hasta 2008 calcularon las velocidades geostroficas en una línea perpendicular a la costa frente a la BTS

y encontraron que la CSS se presenta en los 50 km más cercanos a la costa, sobre el borde continental, es más intensa y superficial (150 m) durante enero y octubre, mientras que en abril su núcleo se encuentra cercano a los 200 m. La localización de esta corriente coincide con la posición del anclaje de PBE. Las propiedades hidrográficas en el núcleo de la CSS (en promedio alrededor de los 120 m) encontrado en este trabajo no siempre coinciden con las propiedades reportadas por Linacre *et al.* (2010) para estaciones hidrográficas enfrente de la BTS o para las condiciones encontradas por Gay y Chereskin (2009) en el sur de California (ver figura 25). En enero de 2008 la CSS no estuvo bien definida, el máximo subsuperficial fue débil y se encontró a mayor profundidad. En esa época, los valores hidrográficos sí tendieron a coincidir con los de Gay y Chereskin e incluso el núcleo débil estuvo a una mayor salinidad. Para los otros dos periodos comparados, el núcleo de la corriente en el anclaje PBE presentó temperaturas más altas y salinidades y densidades más bajas que las reportadas por Linacre *et al.* (2010) y Gay y Chereskin (2009). Estas discrepancias son de esperarse, dado que en el caso de Linacre el ciclo anual es un promedio de 10 años, mientras que en el caso de Gay y Chereskin se trata de otra región, separada del norte de Baja California por un cambio importante en el ancho de la plataforma continental y por la presencia de un frente donde la corriente superficial tiende a fluir hacia la costa (Chereskin y Niiler, 1994). Además, el núcleo de la corriente presentado por Gay y Chereskin (2009) tiende a ser más profundo que el encontrado en este trabajo. También es importante mencionar que de agosto de 2007 a junio de 2008 hubo un evento frío (Niña) moderado de acuerdo a los valores del índice oceánico de El Niño (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) y del índice multivariado de ENOS (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/mei.html>).

Las observaciones de esta corriente en PBE coinciden con la investigación realizada por Mateos (2010). Usando un modelo numérico para la región frente a Baja California, encontró que la CSS es más intensa en verano y en otoño con valores típicos de 20 y 15 cm s^{-1} , respectivamente, para otoño llega hasta los 15 m de profundidad aunque su núcleo se encuentra por debajo de los 150 m. En invierno se debilita y se presenta por debajo de los 150 m, mientras que en primavera no fue posible apreciarla en los resultados del modelo

numérico. Los resultados para otoño, invierno y verano coinciden con las observaciones de la corriente hacia el polo en el anclaje PBE, donde en verano-otoño se tienen las mayores intensidades y se extienden desde cerca de la superficie hasta los 300 m de profundidad (figura 8). Sin embargo, en la primavera de 2008 también se observaron valores intensos de la CSS. No se encontró relación entre el esfuerzo del viento local y la intensidad de la CSS coincidiendo con la modelación de Mateos (2010), en la cual al comparar diferentes escenarios de forzamientos afirma que no es necesario que exista forzamiento del viento para que se presente la estructura de la CSS.

Capítulo 5

Conclusiones

Se encontró una relación muy débil entre las corrientes internas y externas a la bahía y con el esfuerzo del viento local. De todos los casos analizados, únicamente las corrientes en la entrada norte y las más cercanas a la superficie en el cañón, presentaron coherencia con el esfuerzo del viento en las bandas de 1/6.6 a 1/5.5 cpd.

La estructura vertical de las fluctuaciones de la corriente es aproximadamente barotrópica en la entrada norte y baroclínica, pero con una estructura compleja, en la sección del cañón. En el cañón, las fluctuaciones de la corriente están alineadas con el eje del cañón por debajo de los 100 m pero tienen una dirección norte sur por arriba de esta profundidad. La componente perpendicular a la sección sí tiene una estructura baroclínica.

El patrón de corrientes medias en ambas entradas de la bahía muestra que el agua entra por la entrada norte y sale por la sección del cañón. Las fluctuaciones de la corriente también son coherentes en ambas entradas y consistentes con el esquema de circulación de la corriente media: una intensificación de las corrientes entrando por la EN esta acompañada de una intensificación de las corrientes saliendo de la bahía por la sección del cañón.

Se encontró una relación fuerte entre las oscilaciones de las corrientes y la presión subsuperficial en la entrada norte y las corrientes cercanas a la superficie y a 150 m de profundidad en el cañón. En base a las coherencias y a los desfases encontrados, se propone un posible mecanismo mediante el cual oscilaciones de la corriente en el cañón, inducen variaciones de la profundidad de la piconclina, lo cual a su vez origina oscilaciones del nivel del mar y de las corrientes en la bahía. Las oscilaciones de la profundidad de las isotermas en el cañón, estimadas para otro periodo de medición, son de magnitud considerable. La pendiente del cañón puede ser la responsable de inducir las velocidades verticales necesarias para las oscilaciones observadas de las isotermas. Las corrientes en el cañón también son coherentes con el gradiente de presión a lo largo de la costa en bandas coincidentes con las que hay coherencia con la entrada norte. Esto apunta a la posibilidad

de que ondas atrapadas a la costa asociadas a las fluctuaciones del gradiente de presión sean las responsables de las oscilaciones de la corriente encontradas en el cañón.

Se detectó la contracorriente subsuperficial hacia el polo en el anclaje más alejado de la costa como a unos 20 km de Punta Banda y con una profundidad del fondo de 600 m. El máximo de la corriente media se encontró a 125 m y con valores de unos 13 cm s^{-1} . El promedio de la contracorriente se extiende desde por lo menos 50 m hasta 600 m pero decrece hasta valores menores de 1 cm s^{-1} a esta profundidad. Las fluctuaciones de la corriente también tienen amplitud máxima alrededor de los 125 m. Las propiedades termohalinas difieren de las reportadas para la región para ciertos periodos, pero esto se puede deber a que dichos reportes se basan en condiciones promedio durante varios años. Durante 2007-2008 hubo un evento frío moderado y esto puede haber influido en las diferencias encontradas. La profundidad del núcleo encontrado es menor que lo que se ha encontrado en el sur de California pero comparable a lo encontrado en el norte del mismo estado. También se encontró que la fuerza del gradiente de presión a lo largo de la costa es un término importante para la aceleración local de la contracorriente detectada en el anclaje más exterior a la bahía en las bandas de 1/15 y 1/12 cpd.

Bibliografía

- Álvarez, L. (1977). Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, **4**(1): 81-89.
- Álvarez, L., R. Hernández y R. Durazo. (1988). Drift patterns of lagrangian tracers in Todos Santos Bay. *Ciencias Marinas*, **14**(4): 135-162.
- Argote, M., F. Gavidía y A. Amador. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos Bay, B.C., México. *Atmósfera*, **4**: 101-115.
- Barton, E. D. (1985). Low-frequency variability of currents and temperatures on the Pacific continental shelf off northern Baja California, 1978 to 1979. *Continental Shelf Research*, **4**(4): 425-443.
- Barton, E. D. y M. L. Argote. (1980). Hydrographic variability in an upwelling area off northern Baja California in june 1976. *J. Mar. Res.*, **38**(4): 631-649.
- Chapman, D. C. y G. S. Giese. (1990). A Model for the generation of coastal seiches by deep-sea internal waves. *Journal of Physical Oceanography*., **20**: 1459-1467
- Chereskin, T. K. y P.P. Niiler. (1994). Circulation in the Ensenada Front-september 1988. *Deep-Sea Research I.*, **41**(8): 1251-1287.
- Chelton, D. B. (1984). Seasonal variability of alongshore geostrophic velocity off central California. *J. Geophys. Res.*, **89**: 3473-3486.
- Collins, C.A., N. Garfield, T.A. Rago, F.W. Rischmiller y E. Carter. (2000). Mean structure of the inshore countercurrent and California undercurrent off Point sur, California. *Deep-Sea Research*, **47**: 765-782.
- Durazo, R., A. M. Ramírez-Manguilar, L.E. Miranda y L.A. Soto-Mardones. (2010). Climatología de variables hidrográficas. En: Gaxiola, G. y R. Durazo (Eds.). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., 25-57 p.
- Durazo, R. y L. G. Álvarez. (1988). Kinematics of the southern region of Bahia de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*, **14**(1): 95-114.
- Emery, W. J. y R. E. Thompson. (1997). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Institute of Ocean Sciences. Sidney. 632 pp.
- Gavidía, F. (1988). Simulación numérica de la circulación barotrópica en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Tesis de Maestría, CICESE.
- Gay P.S., y T.K. Chereskin. (2009). Mean structure and seasonal variability of the poleward undercurrent off southern California. *J. Geophys. Res.* **114**: C02007.

- Haury, L.R., E.L. Venrick, C. L. Fey, J. A. McGowan y P. P. Niiler. (1993). The Ensenada Front: July 1985. *CalCOFI Reports*, **34**, 69–88.
- Hickey, B.M. (1998). Coastal oceanography of western North America from the tip of Baja California to Vancouver Island. En: Robinson A. R., K.H. Brink (Eds.), *Coastal Segment, The Sea*, Vol 11. Wiley, New York. 345–391 p.
- Linacre, L., R. Durazo, J. M. Hernández-Ayón, F. Delgadillo-Hinojosa, G. Cervantes-Díaz, J. R. Lara-Lara, V. Camacho-Ibar, A. Siqueros-Valencia, C. Bazán-Guzmán. (2001). Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal monitoring observatory: Station ENSENADA. *Continental Shelf Research*. **30**: 1730-1742.
- Lynn, R. J. y J. J. Simpson (1987). The California Current system: the seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, **92**: 12947-12966.
- Mateos, E. (2010). Modelación de la circulación costera estacional en la región norte de Baja California y sur de California y de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Doctorado, CICESE.
- Mateos, E., S. Marinone y A. Parés-Sierra. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B.C., México. *Ocean Modelling*, **27**: 107-112.
- McCreary, J. P. (1981). A Linear Stratified Ocean Model of the Coastal Undercurrent. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. **302**(1469): 385-413.
- Pares-Sierra, A. y J. J. O'Brien. (1989). The seasonal and interannual variability of the California Current system: a numerical model. *Journal of Geophysical research*, **94**: 3159–3180
- Perez-Brunius. P., M. López, A. Pares-Sierra y J. Pineda. (2007). Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* **48**: 204–214.
- Wooster, W. S. y J.H. Jones. (1970). California Undercurrent off northern Baja California. *J. Mar. Res.*, **28**: 235-250.