

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



APLICACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO
TRIDIMENSIONAL PARA ESTUDIAR LA HIDRODINÁMICA
DE LA BAHÍA DE TODOS SANTOS.

TESIS

que para obtener el título de
OCEANÓLOGO

Presenta:

Rebeca Zertuche Chanes

RESUMEN

La Bahía de Todos Santos (BTS) es un cuerpo de agua semi-cerrado, cuenta con un área aproximada de $\sim 190 \text{ km}^2$ donde el 80% de su área tiene profundidades menores a los 50 m. Limita al norte con Punta San Miguel (PSM), al sur con Punta Banda (PB), al este con la ciudad de Ensenada y el estero de Punta Banda (EPB), y al oeste con las Islas de Todos Santos (ITS) y con el océano adyacente. En este trabajo se presentan algunos patrones básicos de circulación superficial de acuerdo a la variación diaria (bajamar-pleamar), quincenal (marea viva-marea muerta) y estacional definida por 2 meses del año (marzo-octubre), así como el flujo residual de intercambio con el océano adyacente. Estos patrones de circulación se obtuvieron con la ayuda de un modelo hidrodinámico tridimensional, ELCOM (Estuary and Lake Computer Model), que utiliza módulos hidrodinámicos y termodinámicos para simular la variabilidad espacial y temporal de cuerpos de agua sometidos a forzantes ambientales. Para forzar el modelo se utilizaron perfiles de temperatura y salinidad obtenidos mediante dos cruceros oceanográficos y aplicados en posiciones definidas dentro y fuera de la bahía, datos meteorológicos y datos de nivel del mar. Cabe mencionar que el modelo fue validado con datos de corrientes superficiales medidos por radares de alta frecuencia y por una serie de tiempo de marea astronómica. Los resultados mostraron una circulación ciclónica que cubrió casi toda la BTS en la mayoría de los escenarios estudiados. En marzo se observó un remolino ciclónico bien definido que cubrió casi todo el interior de la BTS. Durante el periodo de octubre el remolino ciclónico se deformó, posiblemente debido a una corriente con dirección oeste paralela a la cadena montañosa de Punta Banda. Un patrón que predominó en ambos periodos, fue un flujo de salida (de $\sim 2 \text{ km}$ de ancho) cercano a la costa del Sauzal y San Miguel (boca norte) y un flujo de salida por la costa de Punta Banda (boca sur). La circulación cercana a la isla fue muy variable, presentó cambios en función de la estación del año y de la dinámica influenciada por las mareas vivas y muertas. En la boca sur, bajo condiciones de mareas muertas, se observó un flujo subsuperficial (entre los 10 y los 50 m de profundidad) hacia el interior de la bahía, mientras que en la parte profunda (profundidades mayores a los 100 m) la tendencia dominante del flujo fue hacia afuera de la bahía. Bajo condiciones de mareas vivas, el flujo subsuperficial desapareció, mientras que en la zona profunda se observó un flujo de entrada (salida) en el extremo oeste (este) de la boca sur. En la región cercana al Puerto de Ensenada y la playa municipal, se observaron corrientes tenues ($< 5 \text{ cm/s}$) durante las dos épocas del año estudiadas en este trabajo, y fueron siempre asociadas a temperaturas relativamente cálidas ($14 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$). En general, la dinámica presentada en este trabajo y simulada con ELCOM, muestra básicamente una tendencia a re-circulación dentro de la BTS, dicha característica puede tener repercusiones en la calidad del agua de la BTS.

Palabras clave: *Simulación numérica, ELCOM, Hidrodinámica, Bahía de Todos Santos.*

APLICACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL
PARA ESTUDIAR LA HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE
TODOS SANTOS.

TESIS

QUE PRESENTA:

REBECA ZERTUCHE CHANES

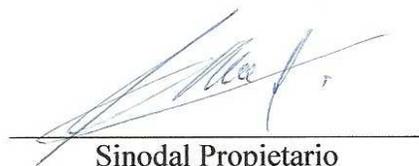
APORBADA POR:



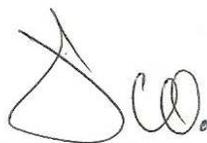
Presidente del Jurado
Dr. Xavier Flores Vidal



Sinodal Propietario
Dr. Reginaldo Durazo Arvizu



Sinodal Propietario
Dr. José Antonio Martínez
Alcalá



Sinodal Propietario
Dr. Francisco Delgadillo
Hinojosa

Agosto del 2013

DEDICATORIA

*A mi abuelito Quique
que a pesar de que no estás,
tu recuerdo siempre me hace sonreír.*

AGRADECIMIENTOS

A mis papás, por el apoyo de tantos años, por siempre ser un ejemplo a seguir y admirar. Por ser mi más grande motivación. ¡Ya soy oceanóloga!

Un agradecimiento enorme a Xavier Flores por creer en mí, por la paciencia, los consejos y el tiempo invertido y la dedicación. Ahora sí me toca la carne asada.

A mi comité: Profe Toño Martínez, Reginaldo Durazo y Francisco Delgadillo; por el apoyo, recomendaciones y sobre todo tiempo.

A Marco Fu! Por siempre ayudarme, enseñarme, aconsejarme y escucharme en los momentos de desesperación. Prometo volverme una experta en *matlab* pronto Fu.

A mis hermanas, Laura y Andrea por sus regaños, sus risas y su compañía a lo largo de todo este tiempo.

A la UABC que ha sido como mi segunda casa en los últimos años y sobre todo a los maestros, maestras y personal administrativo de la Facultad de Ciencias Marinas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido para el proyecto “Estudio de Clasificación de playas: Bahía de Ensenada, Baja California” (clave 143803).

Sin el apoyo de todos ustedes esta investigación no hubiera sido posible.

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.-Objetivo.....	5
1.2.-Área de estudio.....	6
2. METODOLOGÍA	9
2.1.- El Modelo.....	10
2.2.- Batimetría y Condiciones de Frontera.....	12
2.3.-Forzamientos y Perfiles Iniciales.....	15
2.4.- Transectos en las bocas de conexión.....	20
3. VALIDACIÓN DEL MODELO	22
3.1.-Validación con Marea.....	22
3.2.-Validación con HFR.....	23
4. RESULTADOS	31
4.1.-Circulación simulada en Marzo.....	32
4.1.1.-Circulación superficial diurna y quincenal.....	32
4.1.2.- Circulación superficial residual de Marzo.....	36
4.1.3.-Flujos en las bocas.....	37
4.2.-Circulación simulada en Octubre.....	41
4.2.1.-Circulación superficial diurna y quincenal.....	41
4.2.2.- Circulación superficial residual de Octubre.....	45
4.2.3.-Flujos en las bocas.....	46

5. DISCUSIÓN	49
5.1.-Circulación Superficial.....	49
5.2.-Flujos en las bocas.....	52
6. CONCLUSIONES	54
Literatura Citada.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Bahía de Todos Santos, Baja California México.	...6
Figura 2.1. Batimetría y área del dominio del modelo con una malla de resolución de 500 m x 500 m. La frontera abierta se muestra con una línea punteada de color rojo. Los datos de profundidad fueron referidos al [NMM]. Los puntos de color verde indican la posición de donde se obtuvieron los perfiles iniciales de los cruceros oceanográficos del IMECOCAL estación 100.45 y la FCM estación C4	...14
Figura 2.2. Series de tiempo del nivel del mar con las que fueron forzadas las simulaciones. Producto del programa MARV10 producido por el laboratorio de nivel de mar del CICESE.	...16
Figura 2.3. Series de tiempo de los forzamientos meteorológicos para la simulación del mes de Marzo.	...17
Figura 2.4. Series de tiempo de los forzamientos meteorológicos para la simulación del mes de Octubre.	...18
Figura 2.5. Condiciones iniciales de la simulación. Datos obtenidos durante el crucero FCM-C4, 2010 (A y B). Condiciones iniciales en la frontera abierta. Datos obtenidos durante el crucero IMECOCAL, 2010 (C y D). En rojo se muestran los perfiles para Octubre y en azul los perfiles para Marzo.	...19
Figura 2.6. Transectos para el estudio de flujos de intercambio en la boca norte y sur de la BTS. La posición de los transectos se muestra con la línea punteada de color rojo.	...20
Figura 3.1. Comparación de la marea predicha por el laboratorio de nivel de mar del CICESE (azul) y la simulación realizada ELCOM (rojo). Serie de tiempo de un día de simulación.	...23
Figura 3.2. Validación de corrientes superficiales. Variación diurna para los días 16 y 18 de Marzo. (A) Bajamar de ELCOM; (B) Bajamar de HFR; (C) Pleamar de ELCOM; (D) Pleamar de HFR.	...25

Figura 3.3. Validación de corrientes superficiales. Variabilidad diurna para los días 9 y 11 de Octubre. (A) Bajamar de ELCOM; (B) Bajamar de HFR; (C) Pleamar de ELCOM; (D) Pleamar de HFR.	...26
Figura 3.4. Correlación espacial de las magnitudes de las corrientes superficiales de ELCOM y los HFR para el periodo de simulación del mes de Marzo.	...27
Figura 3.5. Correlación vectorial de las corrientes superficiales medidas por ELCOM (rojo) y los HFR (negro) para el periodo de simulación del mes de Marzo.	...28
Figura 3.6. Correlación espacial de las magnitudes de las corrientes superficiales de ELCOM y los HFR para el periodo de simulación del mes de Octubre.	...28
Figura 3.7. Correlación vectorial de las corrientes superficiales medidas por ELCOM (rojo) y los HFR (negro) para el periodo de simulación del mes de Octubre.	...29
Figura 4.1. Variación diurna de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Marzo, 2010. (A) y (B) Bajamar; (C) y (D) Pleamar.	...33
Figura 4.2. Variación quincenal de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Marzo, 2010. (A) Marea Muerta; (B) Marea Viva.	...35
Figura 4.3. Flujo medio de las corrientes superficiales de la simulación de Marzo.	...36
Figura 4.4. Flujos en las bocas durante la marea muerta de la simulación de Marzo. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía.	...39
Figura 4.5. Flujos en las bocas durante la marea viva de la simulación de Marzo. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía.	...40
Figura 4.6. Variación diurna de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Octubre, 2010. (A) y (B) Bajamar; (C) y (D) Pleamar.	...42
Figura 4.7. Variación quincenal de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Octubre, 2010. (A) Marea Muerta; (B) Marea Viva.	...44
Figura 4.8. Flujo medio de las corrientes superficiales de la simulación de Octubre.	...45

Figura 4.9. Flujos en las bocas durante la marea muerta de la simulación de Octubre. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía. ...47

Figura 4.10. Flujos en las bocas durante la marea viva de la simulación de Octubre. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía. ...48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Detalles de la configuración del modelo.....	16
--	----

1. INTRODUCCIÓN

El uso de modelos numéricos se ha convertido en una herramienta esencial para estudiar diferentes procesos físicos de la oceanografía. Estos modelos nos ayudan a reproducir el comportamiento hidrodinámico de un cuerpo de agua, lo que a su vez es útil para el manejo adecuado de problemas relacionados con actividades humanas, como lo son; derrames de contaminantes e hidrocarburos en el mar, seguridad durante la navegación, desarrollo turístico en la zona costera, entre otros. Una vez validado un modelo, es posible estudiar por separado factores como la marea y el viento para analizar su influencia sobre la hidrodinámica, y así crear simulaciones que nos permitan estudiar el efecto de cada forzamiento.

La problemática de la contaminación marina y su marcada influencia en la salud de los ecosistemas costeros, se puede relacionar con el aumento creciente de las poblaciones que habitan las zonas costeras y con el incremento de las actividades domésticas, agrícolas e industriales que, por el mal manejo e inadecuado control de los desechos sólidos y líquidos, afectan el medio marino con significativas implicaciones a nivel ecológico, socioeconómico y de salubridad (Marín, *et al.*, 2005 en Ramos-Ortega, *et al.*, 2008).

La Bahía de Ensenada ó Bahía de Todos Santos (BTS), ha experimentado un crecimiento tanto urbano como industrial durante los últimos años. Las actividades en puerto, en particular pesquerías y acuacultura en desarrollo, han hecho necesario implementar medidas de regulación para el tratado de los desechos y aguas residuales (Mateos, *et al.*, 2009).

Estudios sobre la contaminación marina dentro de la BTS en la década de los años ochenta, detectaron que las partes norte y central de la bahía presentaban contaminación por material orgánico y bacterias (Sañudo-Wilhelmy, *et al.*, 1985). Los valores máximos se presentaron durante el verano y los mínimos en invierno, en concordancia con la producción pesquera local y el flujo turístico (Sañudo-Wilhelmy, *et al.*, 1985). En 1983 Orozco-Borbón y Delgadillo-Hinojosa investigaron la contaminación fecal en sedimentos superficiales de la zona litoral de la BTS. Como indicadores de contaminación utilizaron las bacterias coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales. Los sedimentos de las estaciones localizadas hasta un kilómetro de distancia de las descargas de desecho doméstico e industrial, mostraron los valores

más altos de densidad bacteriana (54,000 CF/100 gr). De acuerdo a los resultados, los autores indican que existe una dispersión de la fuente de contaminación hacia el centro y sur de la bahía (Orozco-Borbón y Delgadillo-Hinojosa, 1989). Otro estudio indica que las zonas que presentan mayor riesgo para la salud de la población que utilizan en forma directa la zona costera, son la dársena portuaria y la playa municipal, debido a que se ha detectado la presencia de bacterias patógenas entéricas productoras de enfermedades como son *salmonella* sp. y *shigella* sp. (Orozco-Borbón y Sañudo-Whilhelmy, 1987).

Por otro lado, estudios más enfocados a la hidrodinámica de la Bahía de Todos Santos, Argote-Espinoza, *et al.*, (1975) describen la circulación por medio de un análisis de distribución de temperatura, salinidad y densidad durante un ciclo anual, desde Octubre de 1973 a Septiembre de 1974. El estudio reporta la formación de 2 remolinos en la capa superficial, uno anticiclónico en la parte norte y otro ciclónico en la parte sur. En el mismo estudio se sugirió por primera vez la posibilidad de una entrada de agua por la parte sur siguiendo un flujo paralelo a la costa de Punta Banda hasta salir hacia el oeste por la parte media de la Bahía.

Tiempo después, entre 1980 y 1986, se realizaron observaciones con cuerpos a la deriva superficiales. El promedio espacial de todas las observaciones lagrangianas mostró que los cambios de velocidad de las corrientes se relacionan cualitativamente con cambios de la velocidad del viento únicamente en regiones alejadas de la costa. Como rasgo dominante se observó el ingreso de agua frente a las costas norte y sur de la Bahía, que continúa como una corriente paralela a la costa que da pie a una región de convergencia frente a la boca del Estero de Punta Banda (Álvarez-Sánchez, *et al.*, 1988).

Una circulación similar fue encontrada por medio de un análisis de tamaño de grano de sedimentos en estaciones localizadas en la playa y atrás de la zona de rompiente (Pérez-Higuera y Chee-Barragán, 1984). Se encontró que en la parte norte de la bahía el transporte dominante es hacia el sur, en el centro de la bahía se infirió una circulación hacia el norte en la playa y hacia el sur atrás de la zona de rompiente, y por último en la parte sur la circulación fue predominante hacia el norte.

Argote-Espinoza, *et al.* (1991) utilizaron un modelo numérico hidrodinámico para predecir la circulación por viento inducido en la Bahía de Todos Santos con condiciones representativas de verano, invierno y vientos irregulares “Santana”. Los autores encontraron que

las máximas velocidades de las corrientes simuladas a lo largo de la costa en una banda de ~3km de ancho; son aparentemente inducidas por efectos topográficos y su dirección depende de las estaciones del año. En el mismo trabajo también se muestra que para los vientos de verano con dirección NW, N y W, existe un flujo hacia el interior de la bahía a lo largo de Punta San Miguel y Punta Banda. En esta temporada se localizan áreas de convergencia en la zona adyacente a la barra de arena del Estero de Punta Banda, influenciadas por vientos del noroeste (NW). En invierno los vientos con dirección S, SE y los vientos Santana, parecieron originar un flujo hacia afuera de la bahía en Punta San Miguel. Los autores mencionan que las descargas industriales en la BTS ocurren en los meses de verano en la parte norte de la bahía y de acuerdo a los resultados, las descargas se concentran en el interior de la bahía mientras que si se realiza la descarga en los meses de invierno tiene mayor probabilidad de salir a mar abierto.

Más recientemente, utilizando el modelo numérico tridimensional ROMS (Regional Ocean Modelling System) forzado por el Sistema de Corrientes de California y los vientos sinópticos, Mateos, *et al.*, (2009) realizaron un estudio sobre la circulación general dentro de la BTS. Los autores concluyeron que la circulación general de la bahía en época de verano evoluciona de un remolino anticiclónico que cubre casi toda la bahía, a un remolino ciclónico frente al puerto de Ensenada.

En un estudio posterior, el mismo autor (Mateos, 2010) definió la circulación costera estacional del Sistema de la Corriente de California en la región norte de Baja California y sur de California; así como su influencia sobre la circulación en la Bahía de Todos Santos. El autor encontró que la circulación en la BTS consiste en la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos que evolucionan en escalas temporales de alrededor de 2 días y afirma que la formación de los remolinos se debe a la geometría de la bahía y al desprendimiento de las corrientes en las salientes costeras.

En otro estudio realizado con perfiladores acústicos Doppler (corrientímetros), se registraron velocidades promedio de 5 cm/s en el interior de la bahía y de 7cm/s en la boca norte entre Isla Todos Santos y Punta San Miguel con velocidades máximas de 30 cm/s para ambas zonas. Se observó que el viento local se relaciona sólo con las corrientes en la boca norte y en la superficie del cañón, así como coherencia espectral significativa entre las corrientes de ambas bocas (Miranda-Bojorquez, 2012).

En el presente trabajo se utilizará un modelo numérico para simular de manera tridimensional la circulación de la BTS. Se pretende encontrar patrones persistentes de circulación superficial, cambios quincenales (marea viva y marea muerta), cambios diurnos (bajamar y pleamar), así como el flujo residual de intercambio con el océano adyacente.

Una componente novedosa de este trabajo será la validación del modelo hidrodinámico con mapas horarios de corrientes superficiales obtenidas con radares de alta frecuencia HFR (High Frequency Radars).

Reproducir y estudiar la circulación superficial de la BTS y los flujos de intercambio con el océano adyacente permitirá una mejor planeación de actividades recreativas, rutas de navegación, establecimiento de cultivos acuícolas, descargas y una mejor respuesta ante problemas de contaminación y derrames accidentales.

1.1. OBJETIVO

Estudiar por medio de un modelo numérico, la circulación hidrodinámica superficial dentro de la BTS así como los flujos en las bocas.

Objetivos particulares

- Calibrar un modelo hidrodinámico 3D, por medio de datos de corrientes superficiales medidos por un sistema de radares de alta frecuencia (HFR) instalados en la BTS desde 2009.
- Estudiar patrones hidrodinámicos de la BTS en la banda diurna.
- Estudiar patrones hidrodinámicos de la BTS en la banda quincenal.
- Estudiar los flujos de intercambio en ambas bocas de la BTS

1.2 ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Todos Santos (BTS) se localiza en la costa noroeste de Baja California entre los 31.7° a 31.9° de latitud norte y entre los 116.6° y 116.8° de longitud oeste con un área de $\sim 190 \text{ km}^2$ (Figura 1.1). Limita al norte con Punta San Miguel (PSM), al sur con Punta Banda (PB), al este con la ciudad de Ensenada y el estero de Punta Banda y al oeste con dos conexiones (ó bocas) a mar abierto que están separadas por las Islas de Todos Santos (ITS). La boca norte, entre ITS-PSM, tiene una longitud de $\sim 10 \text{ km}$ con profundidades no mayores a los 60 m, mientras que la boca sur, entre ITS-PB, es de tan sólo $\sim 5 \text{ km}$ pero con profundidades de hasta 400 m que corresponden al cañón submarino de Todos Santos (CTS). La BTS se considera una bahía relativamente somera, donde el 80% de su área es menor a los 50 m de profundidad, con excepción del CTS.

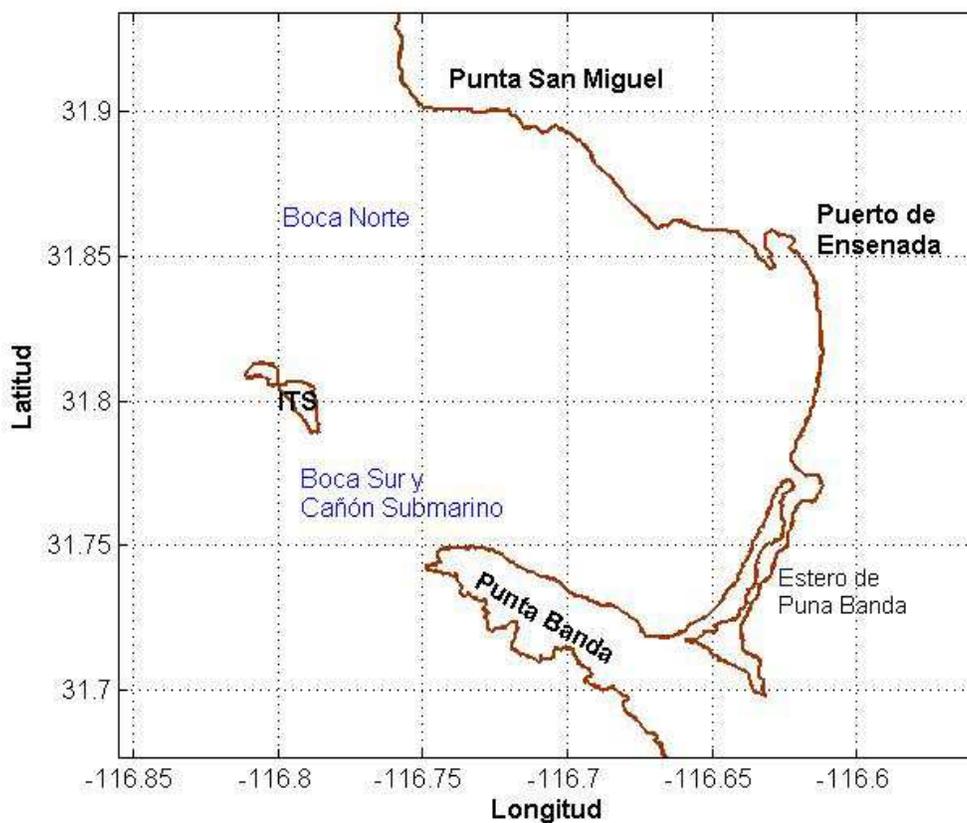


Figura 1.1- Bahía de Todos Santos, Baja California México.

A lo largo de la costa sureste de la BTS, aproximadamente a 15 km al sur del puerto de Ensenada, se encuentra el Estero de Punta Banda (EPB). El estero se caracteriza por un canal en forma de “L”, que es paralelo a una barra de apenas 7 km de longitud que lo separa del océano adyacente. El ancho promedio del estero es aproximadamente 800 m, dependiendo del nivel de marea, con profundidades máximas de 7 m en bajamar media inferior (BMI) en la zona de la boca (Villalba-Loera, 1980).

El entorno fisiográfico de la Bahía de Todos Santos consiste en una plataforma continental angosta. Las isóbatas de 30 m tienden a ser paralelas a la línea de costa, especialmente en la zona de playas arenosas al noreste de la barra del estero de Punta Banda. Las isóbatas superiores a los 30m son irregulares y toman una forma de abanico en la zona del CTS (Castro-Osuna, 2003).

En la BTS dominan los vientos del NW, especialmente en los meses cálidos del año. La mayor diversificación de las direcciones se da en otoño e invierno, lo que puede atribuirse a la ausencia de la baja presión al NE de Baja California (Álvarez-Sánchez, 1977). La cadena de montañas hace que el viento sea paralelo a la costa durante el día y por la noche el aire frío de las montañas fluye hacia el mar. Durante el invierno este fenómeno es más notable y la influencia de la brisa de tierra avanza sobre el océano varias millas fuera de la costa. Durante el verano predomina un régimen de brisas con viento de mar a tierra que se acentúa especialmente después de mediodía (Álvarez-Sánchez, 1977).

La costa norte de Baja California es bien conocida por la persistencia de vientos “Santana” con dirección predominante del E-NE (Trasviña, *et al.*, 2003). Los eventos de vientos Santana transportan material desde la región desértica y están asociados a alta temperatura ambiente y baja humedad. Estos vientos se presentan generalmente entre octubre y marzo, con intensidades de hasta 80 km/h (Castro, *et al.*, 2003), su efecto es perceptible desde la costa hasta cientos de kilómetros mar adentro (Sosa-Avalos, *et al.*, 2005).

La onda de marea es del tipo mixta semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares en un día lunar (24.84 hr). El rango de marea o diferencia entre el nivel de bajamar media inferior y el nivel de pleamar media superior, es de aproximadamente 1.6 m. En un ciclo anual, los niveles de mar más altos se presentan en el verano; mientras que los más bajos suceden durante el invierno (Grivel, 1969; Secretaría de Marina, 2002 en Mancilla-Peraza, *et al.*, 2005).

El comportamiento del oleaje del pacifico mexicano está considerado como bimodal estacional, presentando dos regímenes: primavera-verano y otoño-invierno. La sucesión entre estos dos regímenes en el tiempo no es simétrica, tiene un cambio suave del patrón de primavera-verano a otoño-invierno y un cambio abrupto de la manera contraria (Oropeza-Rosales, 1998). La variabilidad espacial de altura del oleaje dentro de la bahía es inducida por una combinación de factores como el efecto de someramiento y convergencia de energía causada por la refracción del oleaje al momento de su entrada a la bahía, la presencia de la isla de Todos Santos y el cañón submarino de PB (Martínez-Díaz-de-León, *et al.*, 2002).

Según algunos autores, la circulación en el exterior de la BTS tiene un efecto directo sobre la circulación en el interior, en particular la influencia del Sistema de la Corriente de California (SCC) que conforman la corriente de california con dirección al ecuador y la contracorriente sub-superficial de California que viaja hacia el norte (Mateos, 2010). El Sistema de Corrientes de California es uno de los más productivos del mundo, por lo que estos afloramientos son observados también al interior de la BTS.

Durante los meses de abril y mayo, la corriente de California (CC) que transporta agua del sub-ártico se manifiesta cerca de la costa, mientras que se atenúa la contracorriente costera de California (CcC). Al final del verano y durante el otoño la CC es menos intensa, y la CcC se intensifica (Figueroa-González, 2006). Se ha reportado que a los $\sim 32^\circ$ N existe una ramificación de la corriente de California que vira hacia el sureste dando lugar al llamado Frente Ensenada. Este frente se caracteriza por ser persistente todo el año y por ser altamente productivo (Mateos, 2010).

A pesar del estado actual de conocimiento sobre la BTS existen algunos aspectos que siguen requiriendo atención, en particular este trabajo pretende aportar el estudio de los flujos de intercambio con el océano adyacente y la diferencia entre la dinámica de la temporada fría (marzo) y la temporada cálida (octubre) del año mediante un modelo hidrodinámico en 3D validado con radares de alta frecuencia HFR.

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se utilizó un modelo numérico tridimensional con la finalidad de simular la hidrodinámica dentro de la Bahía de Todos Santos para diferentes temporadas del año. Se seleccionó ELCOM debido a que es un modelo diseñado para aguas someras, cuerpos semicerrados y que ha sido aplicado en numerosos cuerpos de agua similares a la BTS. ELCOM trabaja sobre una malla cartesiana rectangular a diferencia de otros modelos que trabajan con coordenadas sigma. Para la configuración del modelo se determinó un paso de tiempo (Δt) óptimo para los días de simulación, los forzantes y módulos activos, así como las condiciones de frontera y de fondo (Tabla 2.1). Una de las ventajas de ELCOM es su rapidez computacional, recursos computacionales modestos y su alta precisión al trabajar con mallas pequeñas (Coronado, *et al.*, 2011). Lo anterior hace de ELCOM un modelo numérico práctico y óptimo para varias aplicaciones.

El modelo ha sido aplicado a distintos cuerpos de agua para el estudio de la circulación, tiempo de residencia y calidad de agua. ELCOM ha sido utilizado en el Puerto de Ensenada dentro de la BTS para evaluar el flujo de agua limpia y oxigenada (Coronado, 2003). En Israel se realizaron estudios de parches de fitoplancton y productividad (Hillmer, *et al.*, 2008). En el lago Kinneret para evaluar la hidrodinámica de acuerdo a variaciones espaciales y temporales de viento (Laval, *et al.*, 2003a). Mientras que en el lago Ontario para el estudio de la dinámica de flujo en forma de chorro (Paturi, *et al.*, 2012). En Venezuela se han usado para estudiar el intercambio entre el Golfo y el lago Maracaibo (Laval, *et al.*, 2003b), además de un estudio de calidad de agua en la cuenca Boulder cercana al área de Las Vegas, EUA (Hannoun, *et al.*, 2006), entre otros trabajos en Australia, Corea y Japón.

2.1. El Modelo

El modelo matemático **ELCOM** (Estuary and Lake Computer Model) desarrollado por el “Center of Water Research” (CWR) de la Universidad del Oeste de Australia, es una herramienta de modelación numérica que aplica módulos termodinámicos e hidrodinámicos para simular el comportamiento temporal y espacial de cuerpos de agua estratificados sujetos a forzamientos ambientales.

El método de simulación hidrodinámica resuelve las ecuaciones 3D de Navier-Stokes para fluidos incompresibles y el transporte de escalares utilizando la aproximación hidrostática, y la aproximación de Boussinesq. Los algoritmos hidrodinámicos en ELCOM están basados en el método de Euler-Lagrange de diferencias finitas para la advección del momentum con una solución de gradiente conjugado para la altura de la superficie libre (Casulli y Cheng, 1992). La advección de los escalares pasivos y activos se realiza utilizando una discretización conservativa ULTIMATE QUICKEST (Leonard, 1991).

ELCOM trabaja sobre una malla cartesiana rectangular de tres dimensiones en donde Δx y Δy determinan las dimensiones en un plano horizontal y Δz en la vertical. El estencil es una malla Arakawa-C en donde las velocidades se definen en las caras de la celda y los escalares en el centro. A los bordes de la malla se les asigna una condición de frontera en donde se utilizan condiciones de deslizamiento libre (frontera abierta) en donde actúan forzamientos escalares o de no flujo (frontera cerrada), según sea el caso.

Para un espacio cartesiano con el eje x_3 o z vertical, positivo hacia arriba:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left\{ \nu \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_\beta} \right\} - \epsilon_{\alpha\beta} f U_\beta \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (C U_j) = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(k \frac{\partial C}{\partial x_\beta} \right) + S_c \quad (2)$$

en donde η es la altura de la superficie libre, f es el parámetro de Coriolis; ν y k son los parámetros de viscosidad turbulenta y difusividad turbulenta, y S_c representa fuentes escalares.

Las letras latinas mayúsculas y minúsculas distinguen a los promedio de las cantidades fluctuantes relativas a la escala de tiempo promediada, con (U_i, u_i) representando los vectores de velocidad y (C, c) representando un escalar (*e.g.* temperatura, salinidad o concentración de trazadores) (Hodges, *et al.*, 2000).

Se usa notación tensorial con la convención de sumas de Einstein, aplicada al espacio tridimensional para los subíndices latinos (*e.g.* $\beta= 1,2,3$) y al espacio horizontal de dos componentes $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 0$; $\epsilon_{12} = 1$; $\epsilon_{21} = -1$.

La evolución de la superficie libre se rige por la integración vertical de la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles, aplicada a la condición cinemática de frontera (Hodges, *et al.*, 2000):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_b^\eta U_\alpha dz \quad (3)$$

en donde b es la profundidad máxima.

2.2. Batimetría y Condiciones de Frontera

Se delimitó un dominio que se extiende desde la localidad de Rosarito en el norte (32°21'31.08"N, 117°02'54.41"W) hasta el Ejido Eréndira en el sur (31°16'44.46"N, 116°22'21.38"W) y ~100 km hacia afuera de la BTS. Dentro del dominio se asignaron celdas representativas de tierra, agua y la frontera abierta, siendo esta última las celdas sobre las cuales actúa el forzamiento de la marea (Figura 2.1).

Con el fin de crear una malla batimétrica lo más completa posible se utilizó una compilación de 3 fuentes de datos de profundidad, etopo 1 y etopo2 con resoluciones espaciales de 1 y 2 minutos respectivamente (producto satelital disponible en <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>) y una carta náutica de la Secretaria de Marina de México (SEMAR). Se utilizaron programas como Matlab^{MR} y Surfer^{MR} para interpolar los datos de profundidad y obtener una malla digital con resolución de 500 m x 500 m (Figura 2.1). Además de una malla batimétrica de dimensiones horizontales, también se definió una malla vertical de capas variables. Se estableció una malla en la vertical lo más fina posible para áreas de mayor interés, esto es; de ~1 a 5 metros de espesor desde la superficie hasta abarcar la zona de la termoclina, aumentando hasta llegar a 50 m de espesor en la zona profunda ($z > 300$ m).

Se realizaron varias pruebas para encontrar el paso de tiempo de cálculo más adecuado. Las principales restricciones están dadas por la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL) y la restricción a la ecuación de transporte de momentum (1).

Según Hodges y Dallimore (2013), ELCOM es incondicionalmente estable para flujos barotrópicos y es capaz de producir resultados numéricos estables para cualquier tamaño de paso de tiempo. Sin embargo, para fluidos estratificados, el método de solución discretiza explícitamente los términos baroclínicos en la ecuación (1) que dan origen a una restricción en el tamaño de paso de tiempo basada en la condición de Courant-Friedrichs-Lewy para ondas internas (CFL), tal que es necesario:

$$\sqrt{g'D} \frac{\Delta t}{\Delta x} < \sqrt{2} \quad (4)$$

Los términos de la izquierda se conocen como el número de CFL baroclínicos (CFL_b), donde g' es la gravedad reducida, D es la profundidad, y $\sqrt{g'D}$ es una aproximación de la velocidad de una onda interna.

El paso de tiempo máximo para una condición CFL limitante es:

$$\Delta t < \frac{CFL\Delta x}{U} \quad (5)$$

En donde U es la velocidad, Δt el paso de tiempo y Δx el tamaño de celda.

Existe otra restricción asociada al transporte de escalares. ELCOM utiliza una aproximación explícita asociada a la condición de Courant-Friedrichs-Lewyadectiva (CFL_a) en donde es necesario que:

$$U \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad (6)$$

Una última restricción de estabilidad para esquemas semi-implícitos con difusión horizontal resuelta en forma explícita como la estudiada por Casulli y Cheng (1992), la cual se conoce como la condición de estabilidad por viscosidad y se puede escribir de la siguiente forma:

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2 \Delta y^2}{2\nu(\Delta x^2 + \Delta y^2)} \quad (7)$$

Donde ν es la viscosidad, Δt el paso de tiempo y Δx y Δy el tamaño de la celda en las direcciones x y y .

Además de estas restricciones, que son propias para la estabilidad del esquema utilizado, Hodges y Dallimore (2013) mencionan que el máximo intervalo de calculo que puede ser utilizado también depende de la física de los fenómenos a simular, por lo que es necesario utilizar un paso temporal adecuado para los gradientes de velocidad generados, de tal forma que éstos puedan ser aproximados adecuadamente de forma numérica.

Tomando en cuenta lo anterior, se realizaron varias pruebas para encontrar el paso de tiempo óptimo para las simulaciones realizadas en la BTS. Se encontró que a un paso de tiempo (Δt) de 30 segundos, el modelo trabaja de manera estable, y produce resultados óptimos.

Se realizaron promedios horarios hasta completar una simulación de 15 días para cada 2 meses del año (marzo y octubre). De los 15 días simulados, se extrajeron los resultados dentro del área de estudio y se tomaron las horas y días que definieran los cambios diurnos y quincenales producidos por la marea para estudiar la hidrodinámica superficial de la BTS. Ya que ELCOM permite trabajar de manera tridimensional, se seleccionaron transectos a lo largo de cada una de las bocas que conectan a la BTS con el océano adyacente, para estudiar el flujo residual.

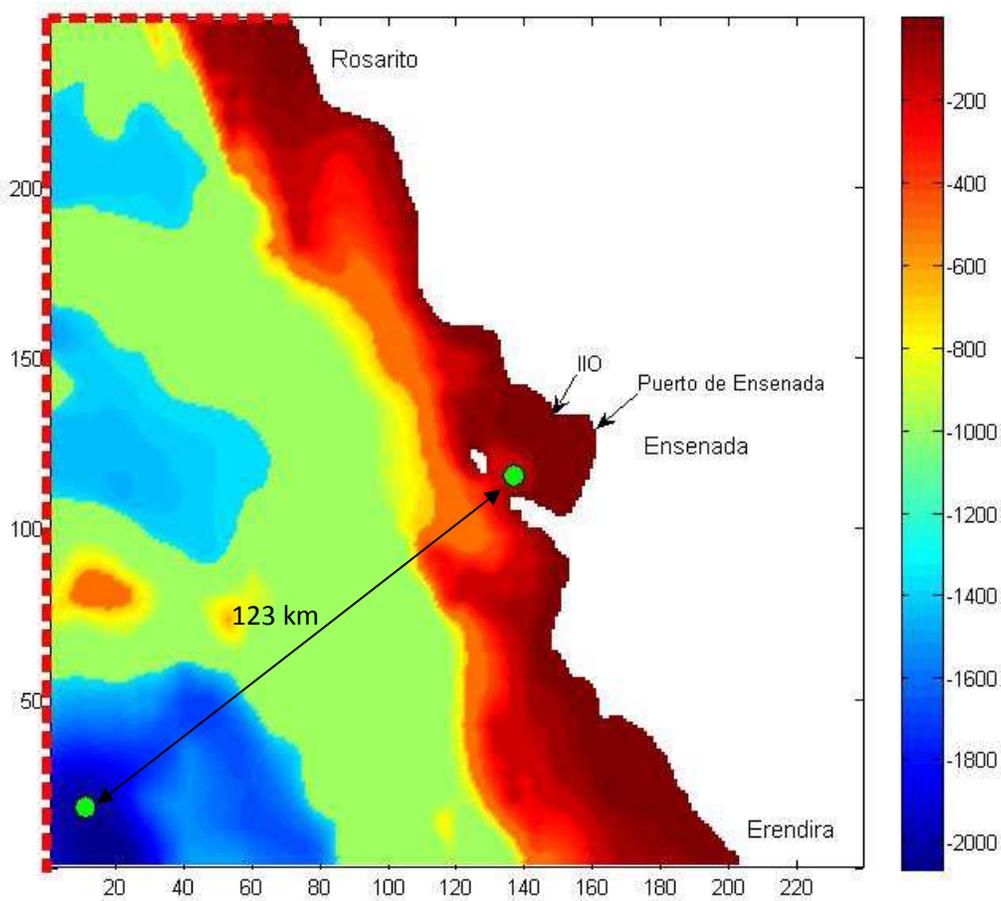


Figura 2.1.- Batimetría y área del dominio del modelo con una malla de resolución de 500 m x 500 m. La frontera abierta se muestra con una línea punteada de color rojo. Los datos de profundidad fueron referidos al [NMM]. Los puntos de color verde indican la posición de donde se obtuvieron los perfiles iniciales de los cruces oceanográficos del IMECOCAL estación 100.45 y la FCM estación C4

2.3 Forzamientos y Perfiles Iniciales

Se utilizó una serie de tiempo de predicciones de marea de Ensenada para marzo y octubre, ambas obtenidas con el programa MARV10 producido por el laboratorio de nivel de mar del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). La serie de tiempo fue referida y aplicada sobre la frontera abierta señalada en la figura 2.1.

Los datos de meteorología fueron obtenidos de una estación meteorológica propiedad del IIO (Instituto de Investigaciones Oceanológicas) marca AANDERAA que se ubica sobre el edificio del instituto a 18 m sobre el nivel del mar. Se utilizaron series de tiempo de las condiciones meteorológicas como la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento para el mes de marzo (Figura 2.3) y para el mes de octubre (Figura 2.4). Estas series de tiempo fueron aplicadas de manera uniforme sobre todo el dominio.

En cuanto a la hidrografía, al modelo se le asignaron dos perfiles iniciales de temperatura y salinidad para caracterizar las condiciones iniciales dentro de la BTS y en la frontera abierta (Figura 2.5). Los datos de temperatura y salinidad se obtuvieron de los cruceros oceanográficos del IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California) para el perfil externo sobre la frontera abierta y la estación C4 del crucero oceanográfico de la Facultad de Ciencias Marinas (FCM) de la UABC para el perfil interno. Ambos correspondientes al año 2010 con una distancia entre ellos de aproximadamente 123 km.

El perfil inicial de marzo en el exterior de la BTS se obtuvo de un promedio de las mediciones de invierno para la estación 100.45 del IMECOCAL mientras que el perfil en el interior de la BTS fue obtenido en la estación C4 del crucero de la FCM el día 11 de Marzo, 2010. Para los perfiles de octubre se obtuvo un promedio de las mediciones de verano y otoño de la misma estación del IMECOCAL y un perfil del día 5 de Octubre del 2010 en la estación C4 del crucero de la FCM en el interior de la BTS.

Tabla 2.1. – Detalles de la configuración del modelo.

Característica	Detalles
Forzantes	Meteorología, nivel del mar
Módulos activados	Radiación solar, temperatura, salinidad, densidad (forzamiento baroclínico), coriolis,
Condiciones de frontera en el fondo	Modelo de turbulencia en la capa béntica (Turbulet Bentic Boundry Layer)
Fricción de Fondo	0.005
Paso de tiempo (Δt)	30 s
Pasos	43200
Periodo de simulación	15 días (2)

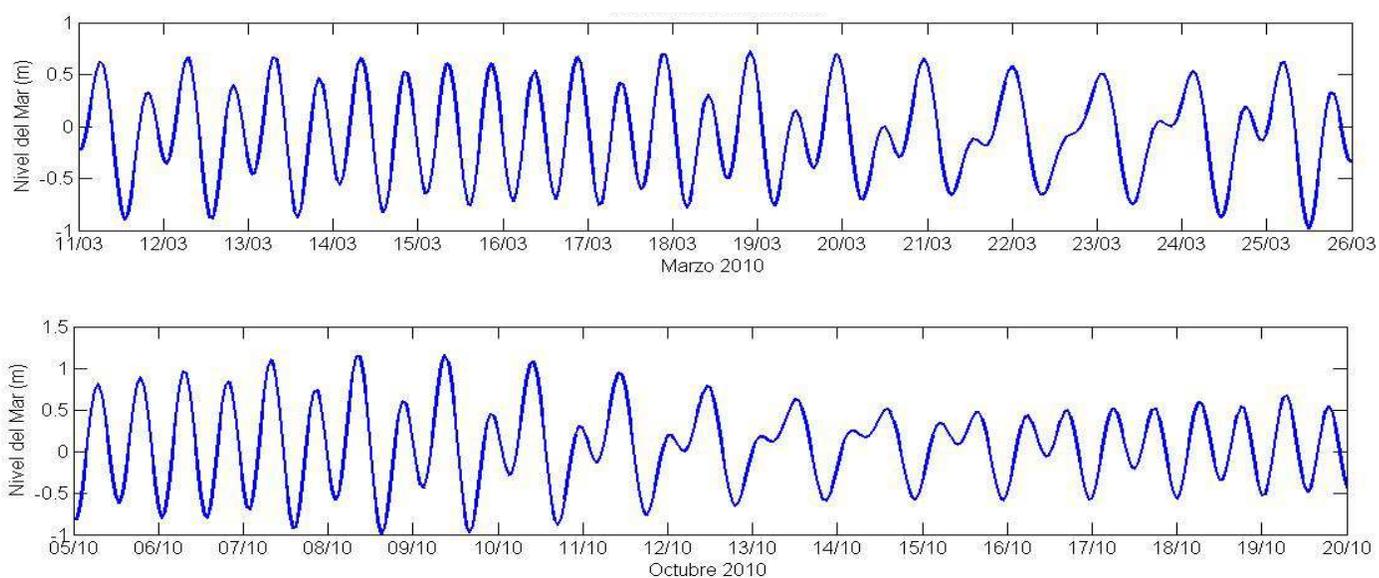


Figura 2.2.- Series de tiempo del nivel del mar con las que fueron forzadas las simulaciones. Producto del programa MARV10 producido por el laboratorio de nivel de mar del CICESE.

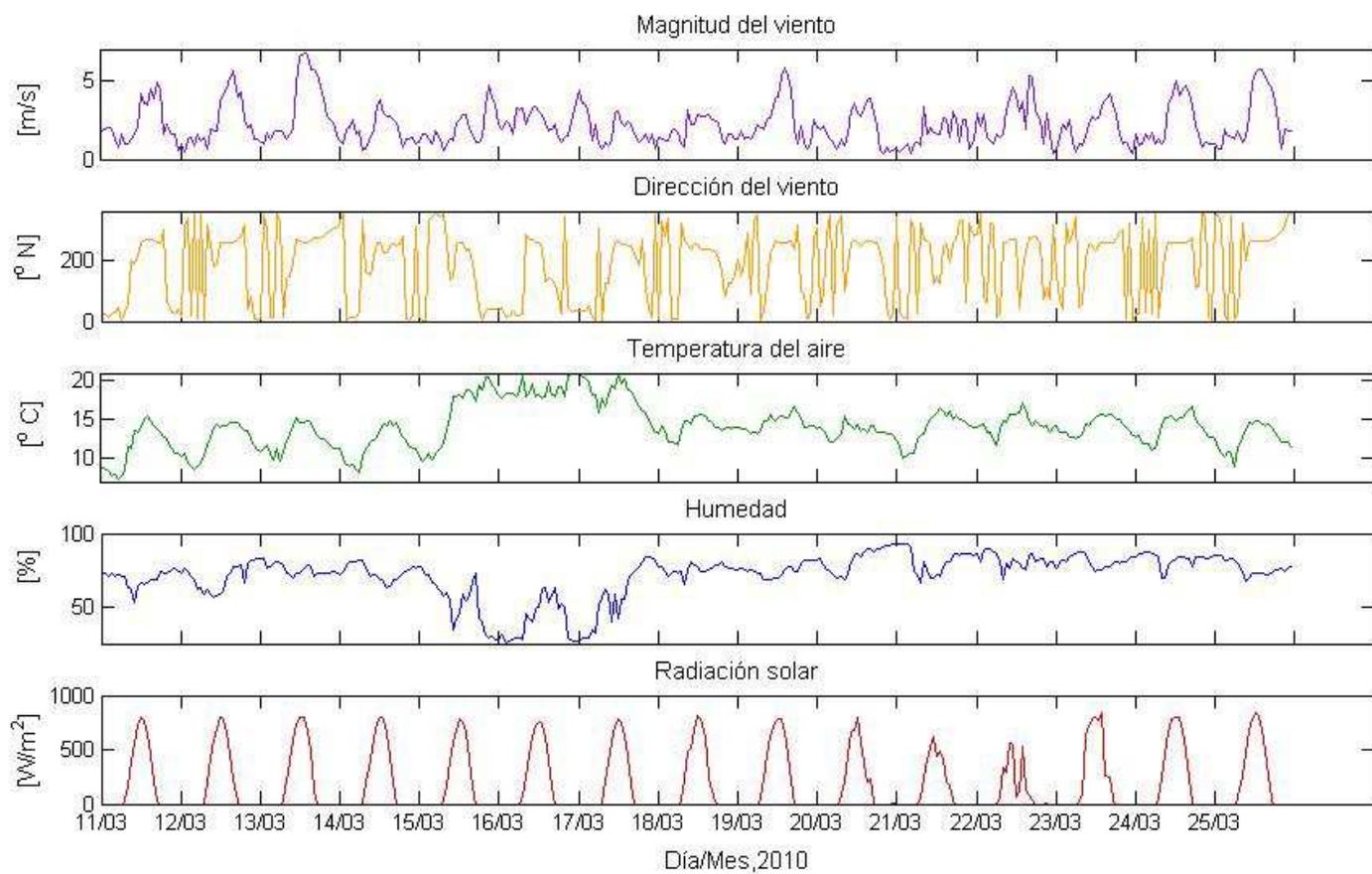


Figura 2.3.- Series de tiempo de los forzamientos meteorológicos para la simulación del mes de Marzo.

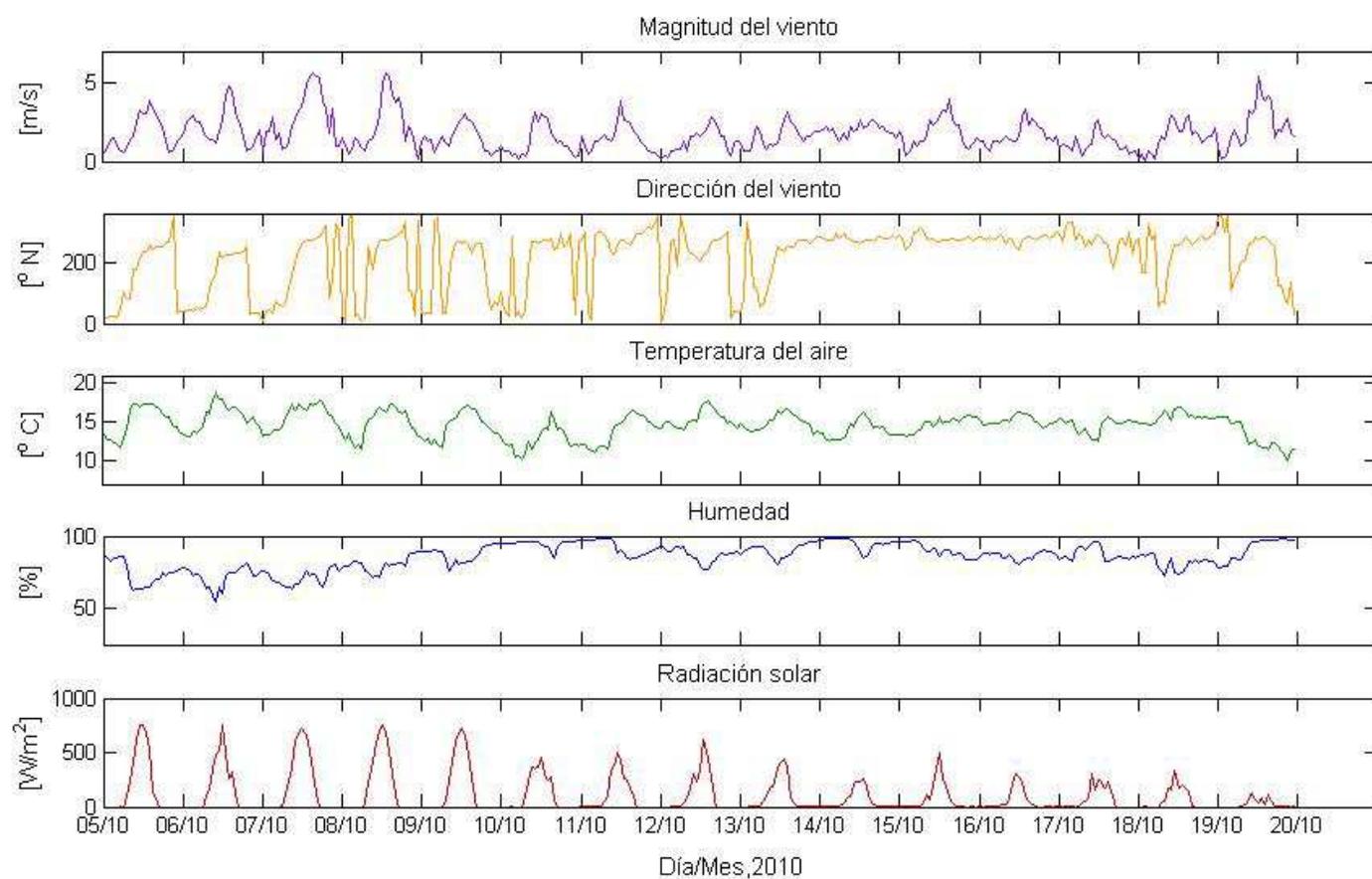


Figura 2.4.- Series de tiempo de los forzamientos meteorológicos para la simulación del mes de Octubre.

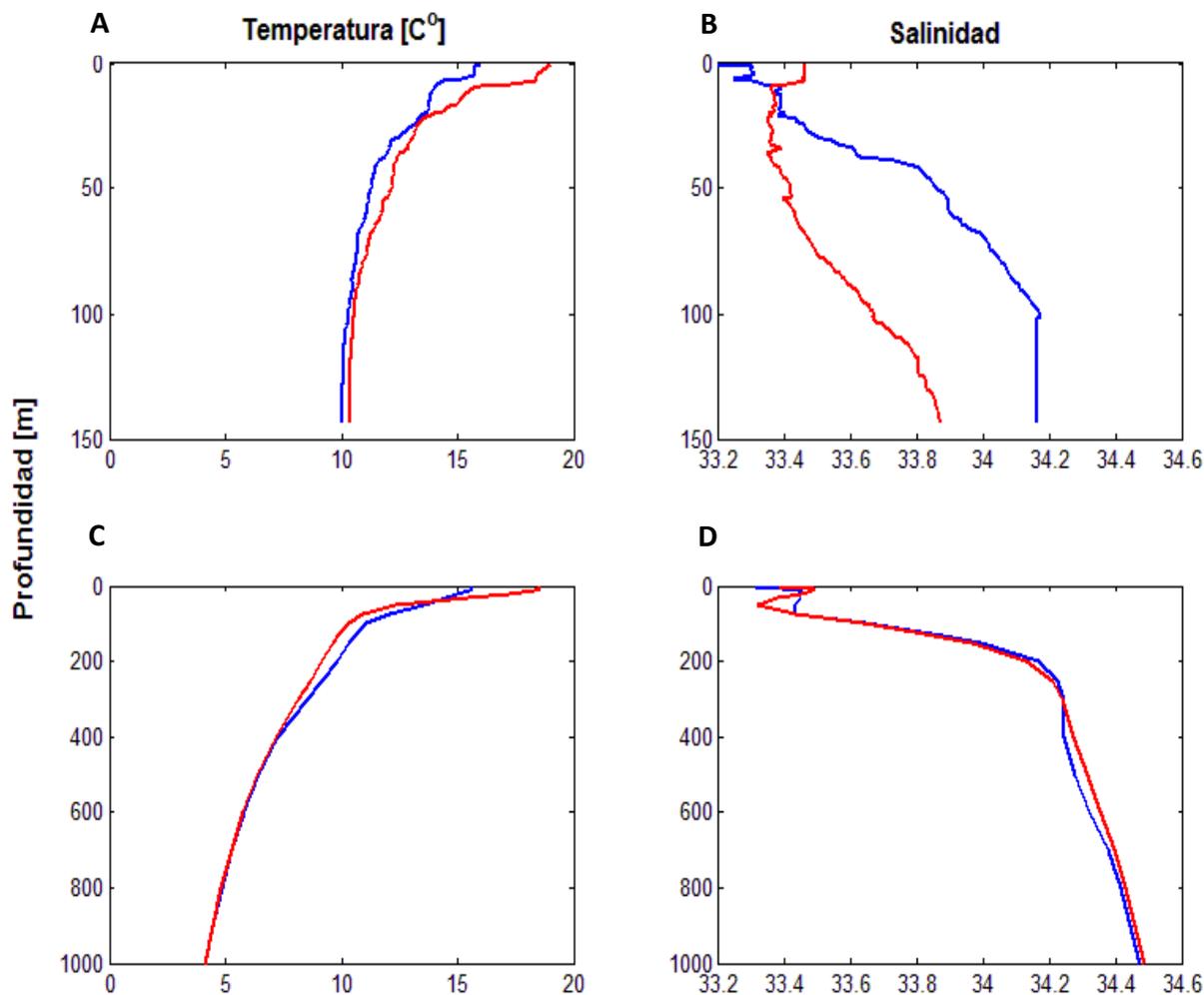


Figura 2.5.- Condiciones iniciales de la simulación. Datos obtenidos durante el crucero FCM-C4, 2010 (A y B). Condiciones iniciales en la frontera abierta. Datos obtenidos durante el crucero IMECOCAL, 2010 (C y D). En rojo se muestran los perfiles utilizados para Octubre y en azul los perfiles utilizados para Marzo.

2.4 Transectos en las bocas de conexión

Para estudiar el flujo en las bocas de la Bahía se asignaron transectos en la boca norte y sur. El transecto para la boca norte (aproximadamente 12km), se delimitó desde Punta San Miguel hasta el extremo norte de la Isla Todos Santos, mientras que el transecto sur fue del extremo norte de Punta Banda a el extremo sur de la Isla Todos Santos con una longitud aproximada de 6 km (Figura 2.6). Con la finalidad de eliminar los efectos de la marea que producen los cambios diarios y obtener un flujo residual, se promediaron periodos representativos de una variación quincenal, *i.e.* periodos de marea viva y periodos de marea muerta.

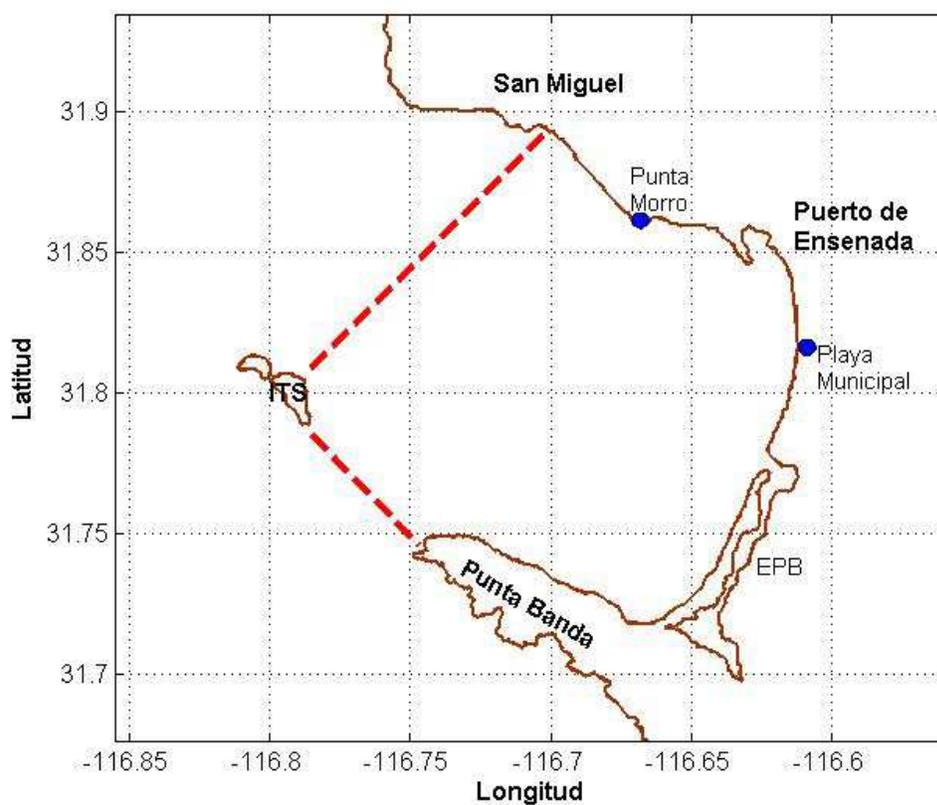


Figura 2.6.- Transectos para el estudio de flujos de intercambio en la boca norte y sur de la BTS. La posición de los transectos se muestra con la línea punteada de color rojo.

A continuación se presenta la sección de validación, en donde se comparan los resultados de ELCOM con las mediciones de los radares de alta frecuencia (HFR). Posteriormente se presentan los resultados de la hidrodinámica observada en marzo y octubre, se muestran los cambios de la circulación superficial diurnos, quincenales y flujo medio de cada mes, así como el flujo residual producido por cambios quincenales en las bocas de conexión. Para finalizar se discuten los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones de este trabajo.

Con la finalidad de reportar datos libres de cualquier inestabilidad numérica se omitieron los 3 primeros días de simulación (spin up) antes de describir los resultados.

3. VALIDACIÓN

Una vez adaptado el modelo, se realizó un análisis de sensibilidad para conocer el comportamiento del modelo con la geometría del dominio y la frontera abierta, esto con la finalidad de observar el correcto funcionamiento del modelo.

Para lo anterior se realizaron comparaciones de la marea predicha con los valores de nivel del mar simulados por ELCOM, así como comparación entre mapas de corrientes superficiales obtenidas por radares de alta frecuencia (HFR) y las corrientes subsuperficiales simuladas con ELCOM.

3.1.- Validación con marea

Para validar la simulación del nivel de mar se utilizaron predicciones astronómicas publicadas en línea por el Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada (CICESE). Se determinó un punto cercano al puerto de Ensenada (lugar de donde se obtienen las predicciones astronómicas de marea) en un día al azar de la simulación, y se extrajo la serie de tiempo de nivel del mar de las simulaciones por ELCOM para el mismo punto geográfico. La figura 3.1 muestra ambas predicciones para el día 17 de marzo del 2010 en representación del mes de marzo y para el día 11 de octubre del 2010 en representación mes de octubre.

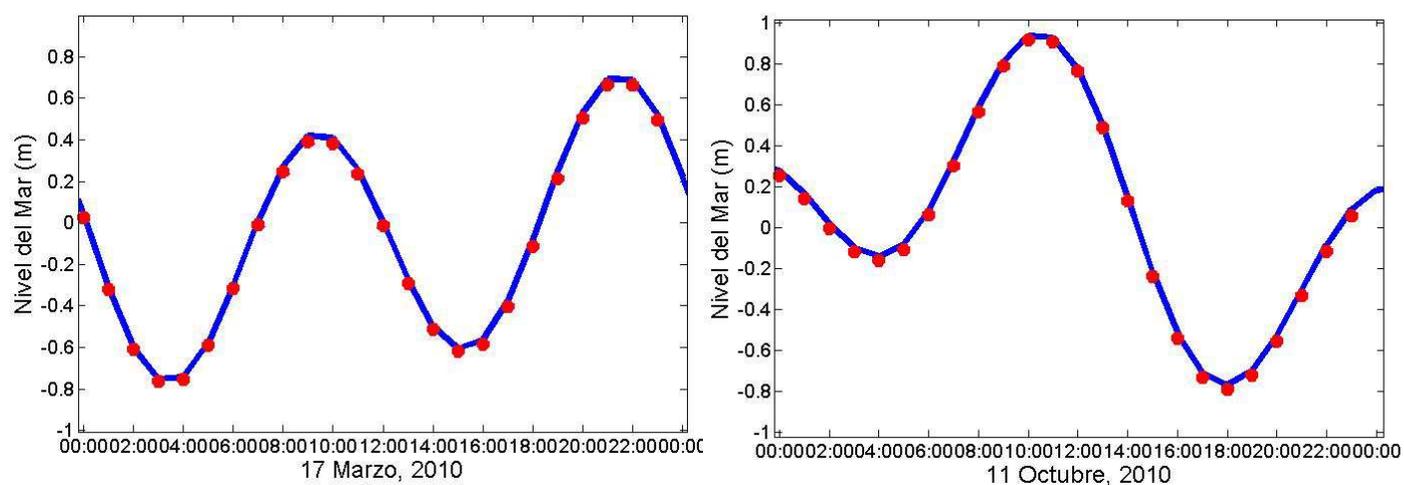


Figura 3.1.- Comparación de la marea predicha por el laboratorio de nivel de mar del CICESE (azul) y la simulación realizada con ELCOM (rojo). Serie de tiempo de un día de simulación.

Se observó que el nivel simulado por ELCOM (rojo) corresponde adecuadamente con los valores de nivel del mar predichos por el laboratorio de nivel del mar del departamento de oceanografía física de CICESE (azul). Esto indica un buen funcionamiento del forzamiento de marea aplicado en la frontera abierta del dominio de la simulación.

3.2.- Validación con HFR

Las mediciones de la corriente superficial de los HFR fue obtenida por medio de un arreglo de 2 radares de alta frecuencia que operan a 25 MHz y se encuentran instalados en los lugares conocidos como: Punta Morro y en la playa el CONALEP ó playa municipal (Figura 2.6.) dentro de la BTS. Este arreglo de HFR obtiene datos horarios (24 horas del día y 365 días del año) con una resolución espacial de 1 km sobre una malla rectangular de 190 km² compuesta de 268 nodos.

Las validaciones fueron realizadas de acuerdo a la disponibilidad de datos de los radares para la variación diurna con una influencia mínima del viento (vientos menores a 1 m/s) en las pleamares y bajamares mejor definidos durante el periodo simulado.

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran las comparaciones cualitativas entre los cambios diurnos de las corrientes superficiales medidas por los HFR y las simuladas por ELCOM para el mes de marzo y octubre, respectivamente. En cada figura el panel: (A) es el bajamar simulado por ELCOM; (B) es el bajamar medido por los HFR; (C) es el pleamar simulado por ELCOM; y (D) es el pleamar medido por los HFR.

En general en las corrientes superficiales de marzo (Figura 3.2) se observa un flujo de entrada por la boca norte en dirección S-SE hacia el interior de la BTS el cual se vuelve casi paralelo a la cadena montañosa de Punta Banda que se define mejor en los resultados de los radares (Panel B y D). En el caso de los resultados de ELCOM se observa que una porción de este flujo sale directamente por la boca sur especialmente en periodos de bajamar (Panel A). En el caso de pleamar (Panel C y D), el flujo de entrada se atenúa y una porción de este cambia de dirección hacia el N-NW.

En las corrientes superficiales de octubre (Figura 3.3) se observó por la boca norte un flujo de salida de aproximadamente 0.2 m/s, en bajamar (Panel A y B) y un flujo no muy intenso (< 0.1 m/s) de entrada en pleamar (Panel C y D). Una característica persistente en pleamar (Panel C y D) fue el flujo hacia el W en la porción S-SE de la BTS (región de la Joya) paralelo a la cadena montañosa de Punta Banda.

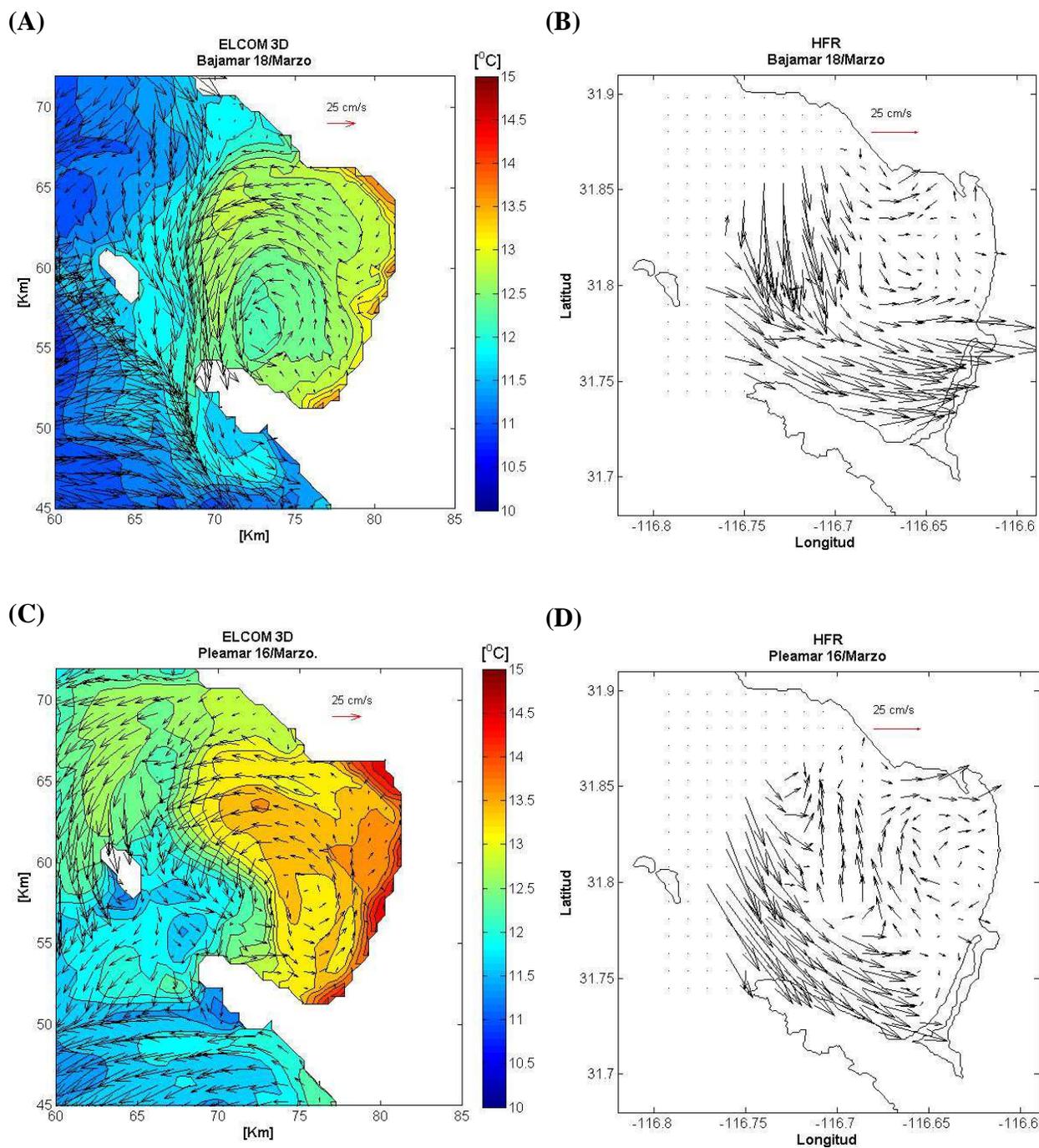


Figura 3.2.- Validación de corrientes superficiales. Variación diaria para los días 16 y 18 de Marzo. (A) Bajamar de ELCOM; (B) Bajamar de HFR; (C) Pleamar de ELCOM; (D) Pleamar de HFR.

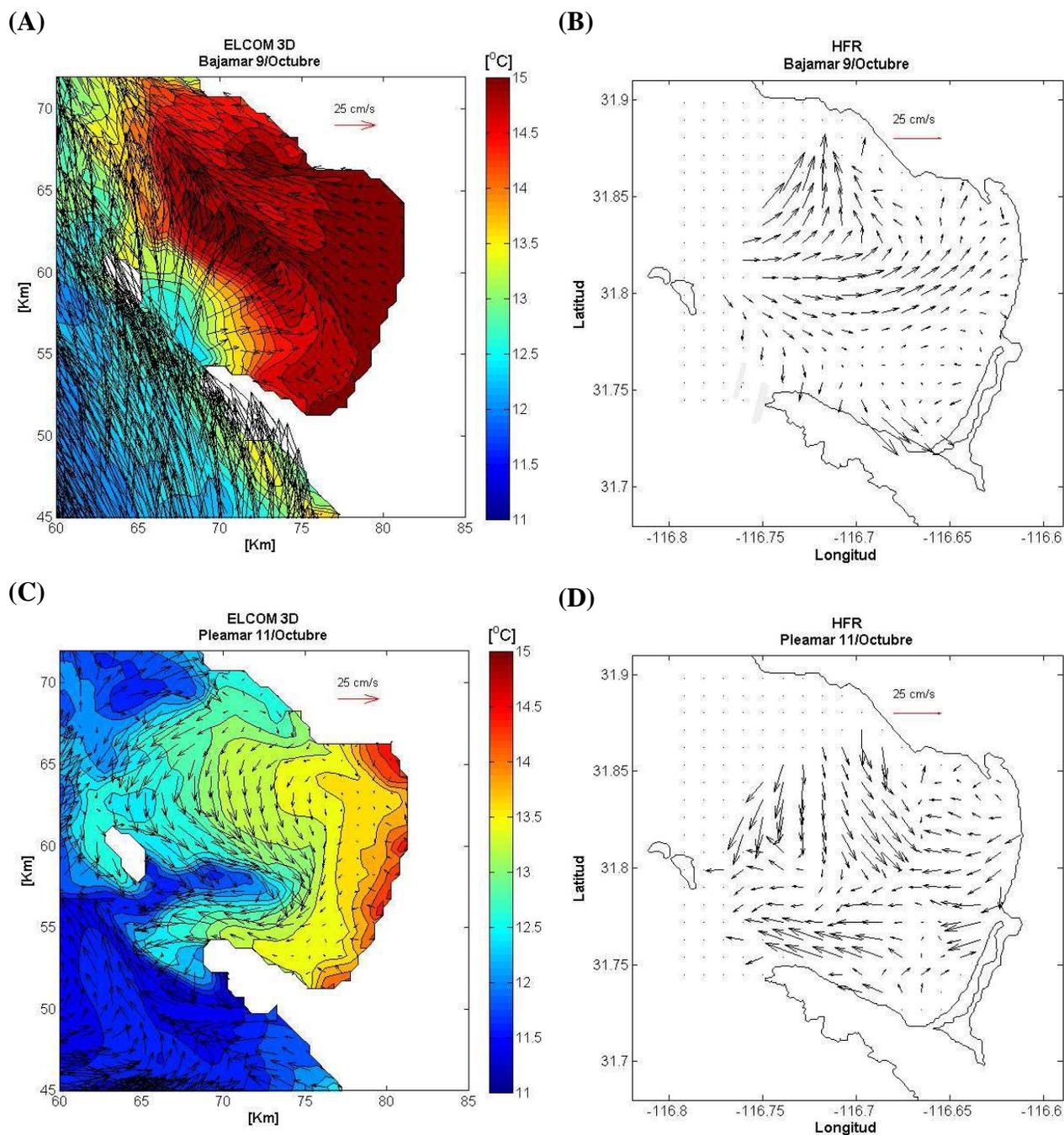


Figura 3.3.- Validación de corrientes superficiales. Variación diurna para los días 9 y 11 de Octubre. (A) Bajamar de ELCOM; (B) Bajamar de HFR; (C) Pleamar de ELCOM; (D) Pleamar de HFR.

A pesar de que se logró observar algunos patrones similares entre ELCOM y los HFR, la mayor parte del tiempo ELCOM subestimó las corrientes en la parte NE de la BTS (en el área del Puerto de Ensenada y la playa municipal) de acuerdo a la variación diurna. Para una mejor apreciación de la similitud se realizó una valoración cuantitativa.

Las figuras 3.4 a la 3.7 muestran las comparaciones cuantitativas obtenidas por medio de una correlación vectorial entre los componentes U y V obtenidas de los 15 días de simulación para marzo y para octubre respectivamente. Se presenta una correlación espacial (Figura 3.4 y 3.6) entre las magnitudes ELCOM y las magnitudes de las corrientes superficiales medidas por los radares dentro de la BTS, para esto se realizó una interpolación de los datos obtenidos del modelo sobre una malla de la misma dimensión de los radares de resolución de 1 km. Una vez identificados los nodos de la malla con mejor resolución se calculó la correlación vectorial para determinar su significancia y desfase de la serie de tiempo para un punto.

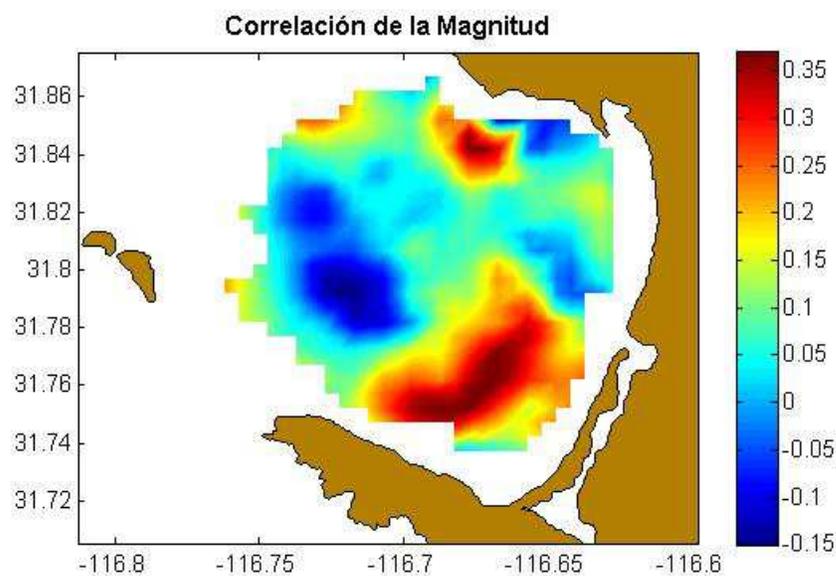


Figura 3.4.- Correlación espacial de las magnitudes de las corrientes superficiales de ELCOM y los HFR para el periodo de simulación del mes de Marzo.

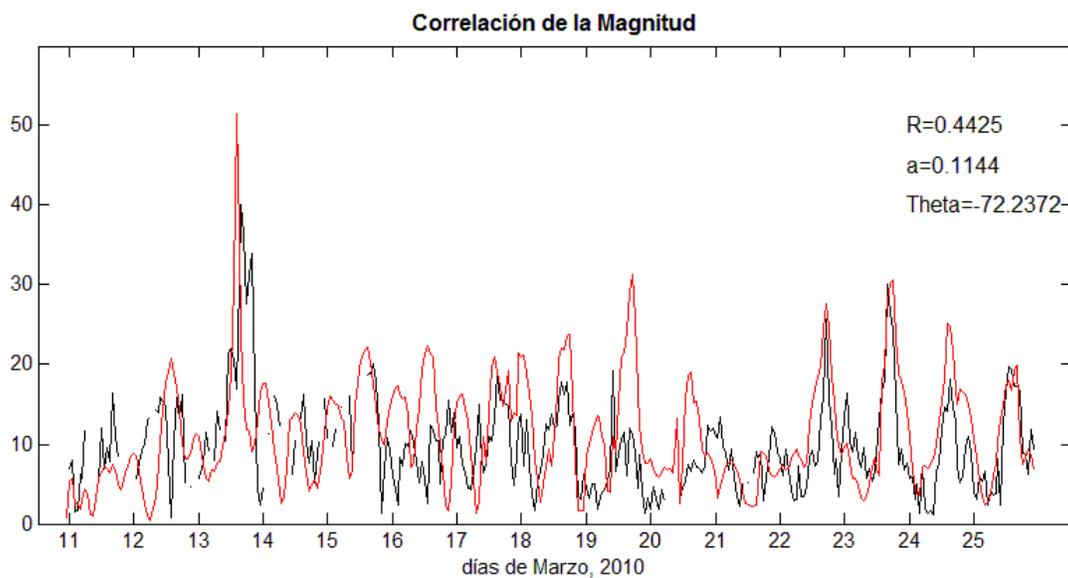


Figura 3.5.- Correlación vectorial de las corrientes superficiales medidas por ELCOM (rojo) y los HFR (negro) para el periodo de simulación del mes de Marzo.

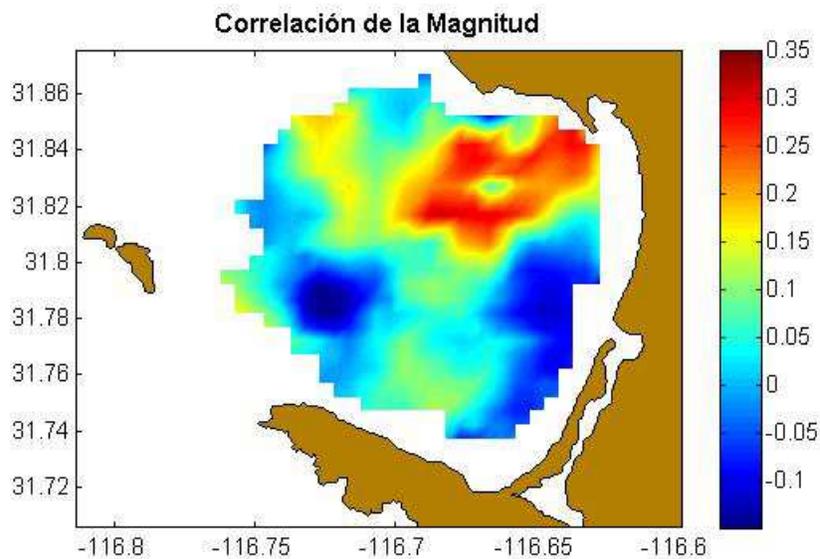


Figura 3.6.- Correlación espacial de las magnitudes de las corrientes superficiales de ELCOM y los HFR para el periodo de simulación del mes de Octubre.

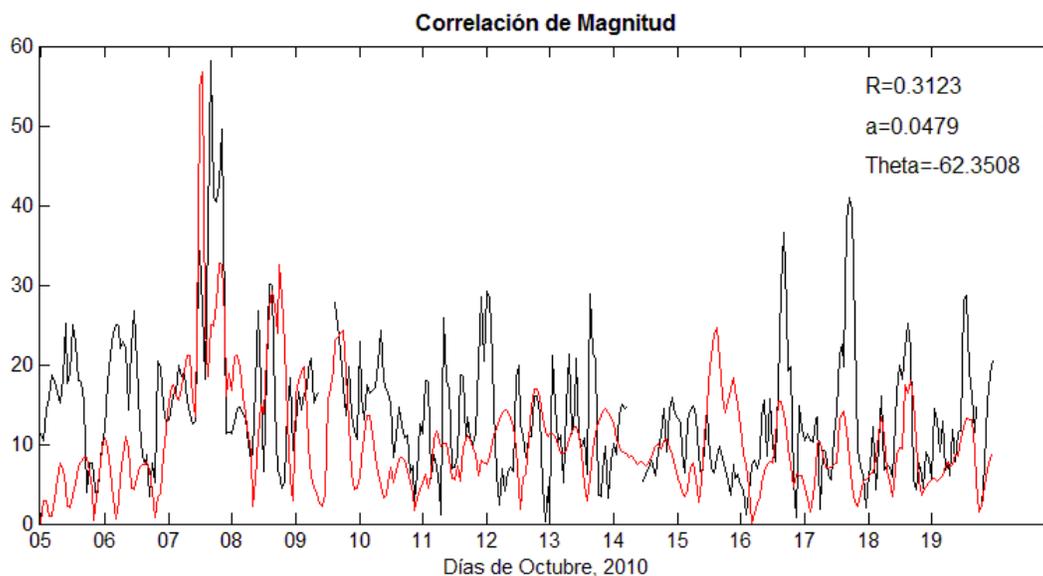


Figura 3.7.- Correlación vectorial de las corrientes superficiales medidas por ELCOM (rojo) y los HFR (negro) para el periodo de simulación del mes de Octubre.

Los valores más altos de correlación en marzo se encontraron en la porción SE de la BTS, mientras que en octubre fueron observados en la porción NE dividiendo la bahía en la zona cercana al estero de Punta Banda.

Las diferencias entre las simulaciones y los datos de HFR, pueden deberse a diversos factores implícitos en los HFR, tales como su cobertura espacial y el ruido electromagnético que pueden provocar radio frecuencias presentes en la zona, mismas que degradan la calidad de los datos de HFR. De la misma manera, en el ámbito de los radares se menciona como término importante a considerar el GDOP (dilución geométrica de precisión) que se refiere a la carencia de ortogonalidad geométrica a lo largo de la línea base que une los espectros de resonancia oceánica medidos por las dos estaciones de HFR. Lo que origina que en las zonas con GDOP bajo (como la zona del Puerto de Ensenada al NE de la BTS), se producen vectores totales con baja precisión debido a que los dos conjuntos de velocidades radiales (medidos por cada una de las estaciones de HFR) se encuentran casi paralelos entre sí (Barrick, 2002).

Por otro lado, es importante mantener en mente que en el modelo el viento es homogéneo en todo el dominio y que existen limitantes en la frontera abierta como lo son la propagación de marea y la falta de la influencia de la corriente y la contra corriente de California que al parecer, tienen una influencia en la circulación de la BTS (Mateos, *et al.*, 2009).

Por otro lado, también se cree que la ausencia en la simulación de rasgos morfológicos y batimétricos importantes (como el Estero de Punta Banda), pudieran ser causa de las diferencias entre los datos medidos por los HFR y los simulados por ELCOM.

De acuerdo a el esquema de resultados de circulación superficial medidos por medio de flotadores por Alvarez-Sánchez *et al.* (1988) y Durazo-Arvizu y Alvarez-Sánchez (1988), se sugiere una región de convergencia situada en la zona adyacente al Estero de Punta Banda en donde se observó una región de convergencia cuando las corrientes son directamente hacia la costa, y con corrientes a lo largo de la costa, la franja adyacente a la barra del Estero se identificó como región divergente.

Con lo anterior en mente, los resultados de ELCOM para ambas estaciones del año y para el periodo de tiempo simulado, muestran similitudes satisfactorias con los datos medidos por los HFR y con la marea astronómica predicha para la zona. Esto nos indica un buen funcionamiento del modelo y nos permite realizar una aproximación numérica de los patrones de circulación en el interior de la BTS y de los flujos de intercambio con el océano adyacente.

4. RESULTADOS

Se presentan las corrientes superficiales y flujos en las bocas de conexión con el océano adyacente. En todos los casos se estudian las variaciones diurnas, quincenales y el flujo medio para todo el periodo de simulación. Los resultados se dividen por mes estudiado y fueron seleccionados por su contenido de importancia hidrodinámica y aspectos que se busca resaltar.

Para estudiar las variaciones diurnas inducida por la marea, se eligieron bajamares y pleamares bajo condiciones de vientos tenues (menores a 1 m/s) y se realizaron promedios de 4 horas de cada uno de estos. Las variaciones quincenales inducidas por las mareas vivas y muertas se estudiaron mediante promedios de 5 días realizados bajo condiciones de mareas vivas y mareas muertas. Por último, el flujo medio se estimó a partir del promedio de todos los días de la simulación para cada mes analizado en este trabajo.

A continuación se presenta para cada mes una descripción de las variaciones diurnas, quincenales y una descripción general del flujo medio superficial. Posteriormente se presenta los flujos de intercambio a través de las bocas.

4.1. Circulación simulada en Marzo

4.1.1. Circulación superficial diurna y quincenal

La figura 4.1 muestra los resultados de las variaciones diurnas de las corrientes superficiales. Durante los bajamares de marzo (Panel A y B) se observó un flujo hacia el S-SE de la BTS. Parte de este flujo salió directamente por la boca sur entre Punta Banda y la ITS asociado al transporte de agua relativamente más cálida (12°C) del interior de la BTS hacia la parte externa de la bahía (más evidente en la zona adyacente a Punta Banda). Otra parte del flujo cambió de dirección hacia el E casi paralelo a Punta Banda y permaneció dentro de la BTS hasta incorporarse a un remolino ciclónico en la región SE de la bahía.

Durante los pleamares de marzo (panel C y D), se observó un patrón similar al de bajamar en la porción norte de la BTS con un flujo hacia el W desde el interior de la bahía y un remolino ciclónico en la porción SE sin flujo de salida por el cañón. Un patrón general observado en todas las figuras fue la corriente con dirección sur que incide en la costa de Punta Banda y cambia de dirección hacia el E (Paneles A, B, C y D). El agua más cálida ($\sim 14^{\circ}\text{C}$) de la BTS se concentró en la región NE y a lo largo de la costa *i.e.* el Puerto de Ensenada, la playa municipal y toda la costa este de la BTS (zona más somera).

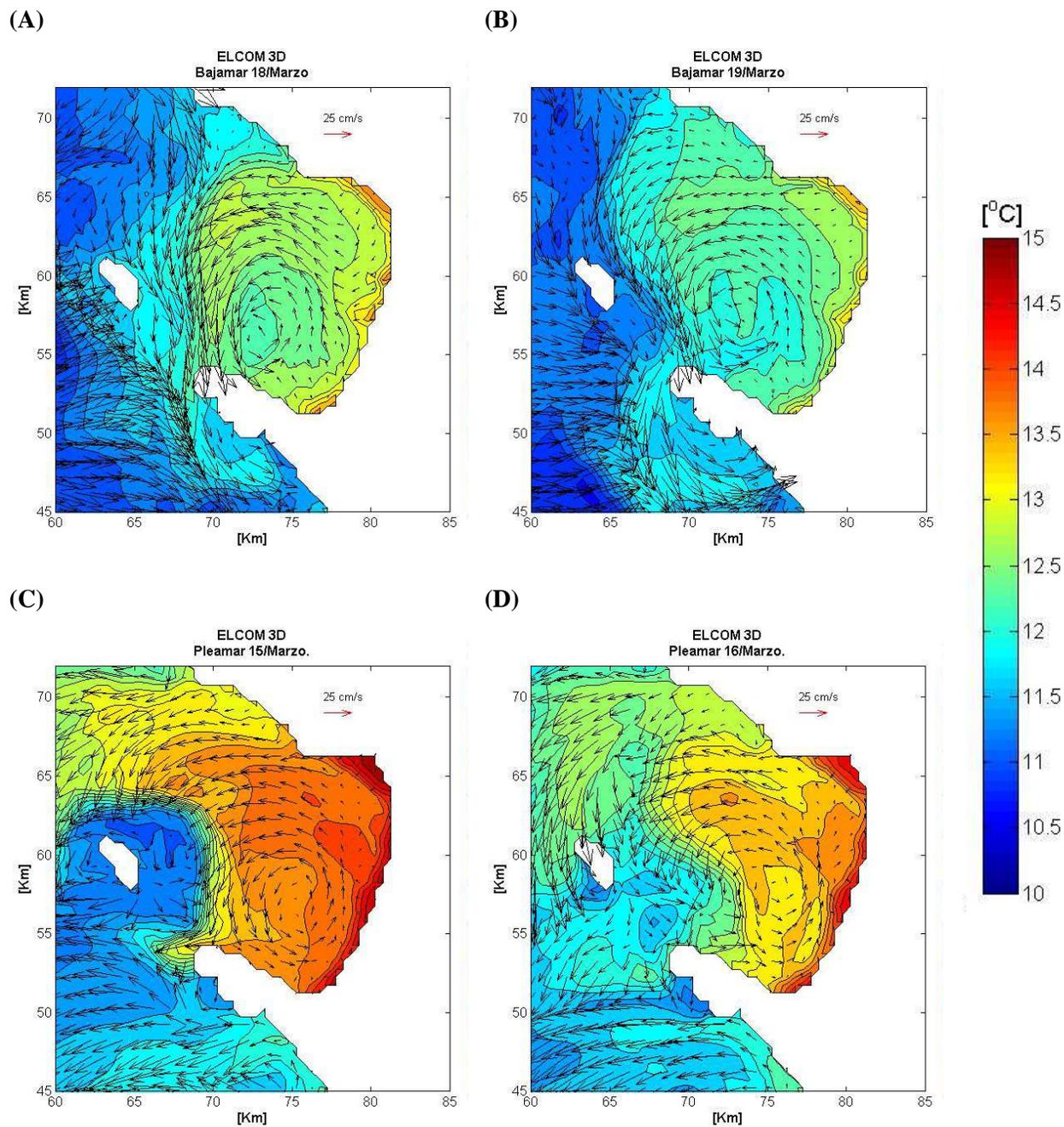


Figura 4.1- Variación diaria de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Marzo, 2010. (A) y (B) Bajamar; (C) y (D) Pleamar.

La variación quincenal de marzo se muestra en la figura 4.2. El panel A muestra un promedio de 5 días de las condiciones de corrientes superficiales durante marea muerta y en el panel B durante marea viva.

En el periodo de marea muerta (Panel A) se observó un flujo proveniente del N con dirección S, SW a lo largo de la boca norte. Una porción del flujo con dirección S entró a la bahía, al llegar a la costa de Punta Banda, viró hacia el E y se incorporó a un remolino ciclónico con núcleo en la parte SE de la BTS, la otra porción viró hacia el oeste y salió de la bahía por la zona del cañón. El remolino ciclónico permaneció al sur de la bahía con corrientes tenues especialmente en zonas cercanas a la costa S y E (< 0.05 m/s) de la BTS. Cercano a la boca norte se observó un flujo (~ 2 km de ancho) paralelo a la costa del Sauzal con dirección N. Las temperaturas más altas (~ 12.5 °C) se observaron en la región donde se encuentra el puerto de Ensenada y la playa municipal en el interior de la BTS.

El patrón de circulación durante un ciclo de mareas vivas se muestra en el panel B. En la boca norte predominaron corrientes que salieron de la BTS casi paralelas a la costa y con dirección W. Bajo estas condiciones el flujo observado durante mareas muertas de una corriente tenue y muy costera que salía por las costas de San Miguel y el Sauzal, ahora es un flujo generalizado que salió abarcando toda la extensión de la boca norte con dirección N-NW. Por otro lado, el flujo hacia el S observado durante mareas muertas se dividió del tal forma que al encontrarse con la península de Punta Banda, su curvatura original hacia el W (E) sufrió una deformación hacia el NW (NE), lo que originó una circulación anti-ciclónica y una entrada de agua por la boca sur. Adicional a esto el apenas discernible remolino ciclónico (corrientes < 0.05 m/c) durante mareas muertas se observó con mayor intensidad (corrientes ~ 0.1 m/s) en la porción SE de la bahía.

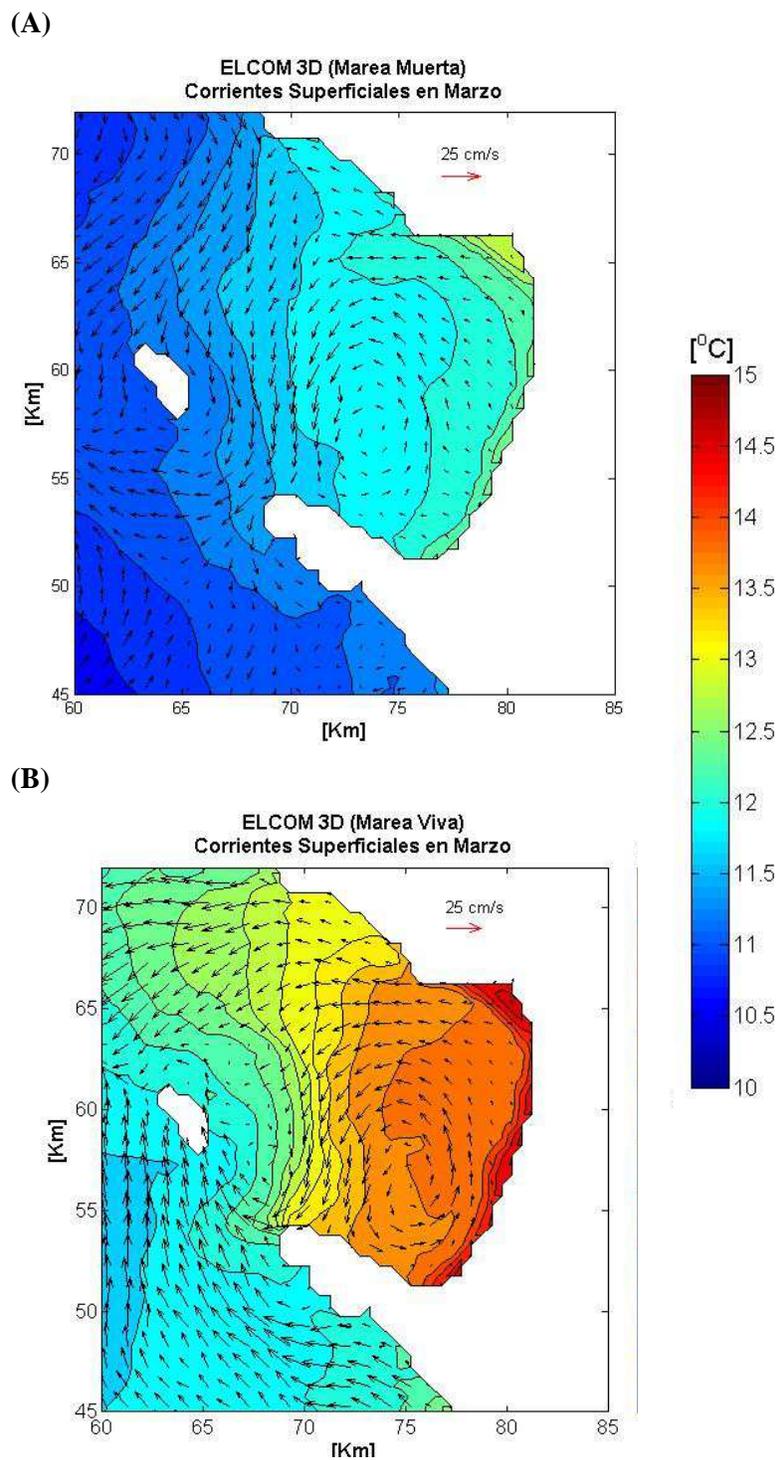


Figura 4.2.- Variación quincenal de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Marzo, 2010. (A) Marea Muerta; (B) Marea Viva.

4.1.2. Circulación superficial residual de Marzo

La figura 4.3 muestra el flujo medio de la simulación de marzo. En general es evidente la formación de un remolino ciclónico bien definido. En la boca norte predominó una salida de agua (a ~ 0.08 m/s y ~ 13 °C) por las costas del Sauzal y corrientes paralelas al eje de la boca mientras que en la boca sur predominó un flujo de salida (a ~ 0.1 m/s y ~ 12.5 °C) por la superficie. Las corrientes más débiles se encuentran cercanas a las costas interiores de la BTS (Puerto de Ensenada y playa municipal).

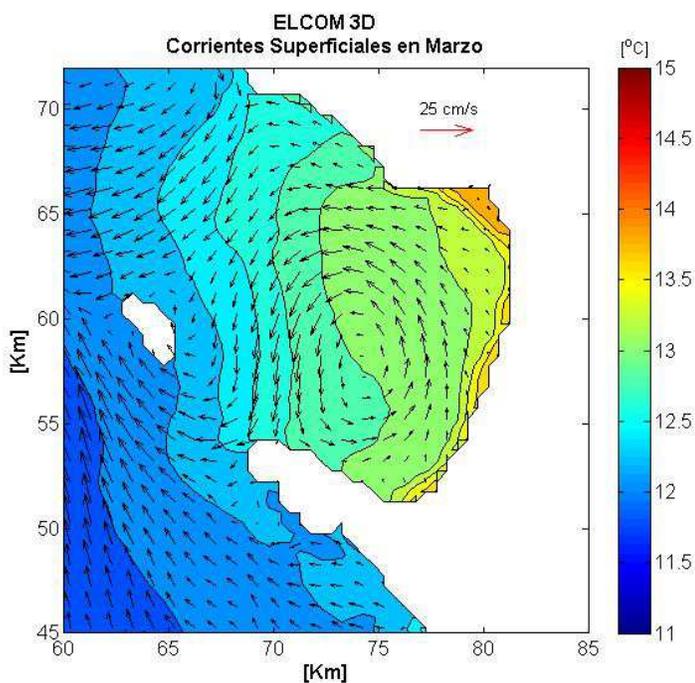


Figura 4.3.- Flujo medio de las corrientes superficiales de la simulación de Marzo.

4.1.3 Flujo en las bocas

Una vez descritos los patrones superficiales de las corrientes en el interior de la BTS un aspecto interesante a estudiar, con el fin de brindar un panorama general de la hidrodinámica en 3D, son los flujos de intercambio de agua a través de las bocas de conexión con el océano adyacente.

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran los resultados del flujo medio de agua en las bocas inducido por la dinámica de mareas vivas y muertas para condiciones del mes de marzo. Los paneles de la figura representan la velocidad de flujo por las bocas, con tonalidades hacia el azul se indica la salida de agua de la BTS y con tonalidades hacia el rojo el flujo hacia el interior. La escala de velocidades para la boca norte es más pequeña (-0.1 - 0.1 m/s) que la escala en la boca sur (-0.25 - 0.25 m/s) debido a que hay un cambio considerable en la magnitud de las corrientes posiblemente debido a la morfología de las bocas.

La figura 4.4A representa el transecto en la boca norte, el eje X (horizontal) indica el largo del transecto en donde el km 0 es un punto cercano a la ITS y el km 12 es el punto más cercano a las costas del Sauzal. En el panel B de la misma figura se presenta el transecto de la boca sur, en el eje horizontal el km 0 es el punto más cercano a Punta Banda y el km 6 es el punto más cercano a la ITS. El eje Y (vertical) indica la profundidad del transecto.

En el caso de la marea muerta (Figura 4.4), en donde las corrientes fueron más tenues en el interior de la BTS, se observó en la boca norte (Panel A) un flujo de agua de ~3 Km de ancho hacia afuera por costas cercanas a San Miguel y el Sauzal que alcanzó hasta los 10 m de profundidad. Del lado izquierdo del transecto que corresponde al área cercana a la Isla de Todos Santos, se observó un flujo de entrada con velocidades mayores a 0.1 m/s que alcanzó hasta los 40 m de profundidad.

En la boca sur (Panel B) se observaron corrientes superficiales hacia afuera con mayor velocidad (> 0.25 m/s) en la costa de Punta Banda, estas corrientes se atenuaron (< 0.05 m/s) en la zona cercana a la Isla de Todos Santos. Entre los 20 y 40 m de profundidad cercano al centro del transecto se observó un área que indica un flujo entrada de agua de alrededor de 0.08 m/s hacia el interior de la BTS. En el área profunda del cañón submarino predominan las corrientes tenues de salida (< 0.05 m/s).

Por otro lado, bajo condiciones de marea viva (Figura 4.5), se observó que predominan los flujos de salida de la BTS en ambos transectos. En la boca norte (Panel A) se observó nuevamente una corriente de salida (~ 0.05 m/s) por las costas cercanas a San Miguel y el Sauzal, así como un flujo de salida de mayor intensidad (~ 0.07 m/s) del lado correspondiente a la Isla y en el fondo a profundidades cercanas a los 30 y 40 m. Dos zonas en donde se presentó un flujo hacia el interior de velocidad casi nulo (< 0.02 m/s), se observaron del lado de las costas del Sauzal desde la superficie hasta los ~ 20 m de profundidad y del lado de la Isla entre los 10 y 45 m de profundidad.

En la boca sur (Panel B), se observó nuevamente un flujo de salida superficial por Punta Banda (< 0.20 m/s). El flujo de salida bien definido abarca la mitad del transecto hasta los ~ 50 m de profundidad. Cercano a la Isla se encontró un flujo de entrada muy tenue de < 0.05 m/s. En la región profunda del cañón de Punta Banda, a pesar de que los flujos son muy tenues (< 0.05 m/s), se logró apreciar una dirección hacia afuera de la BTS del lado de Punta Banda y hacia el interior de la bahía del lado de la isla.

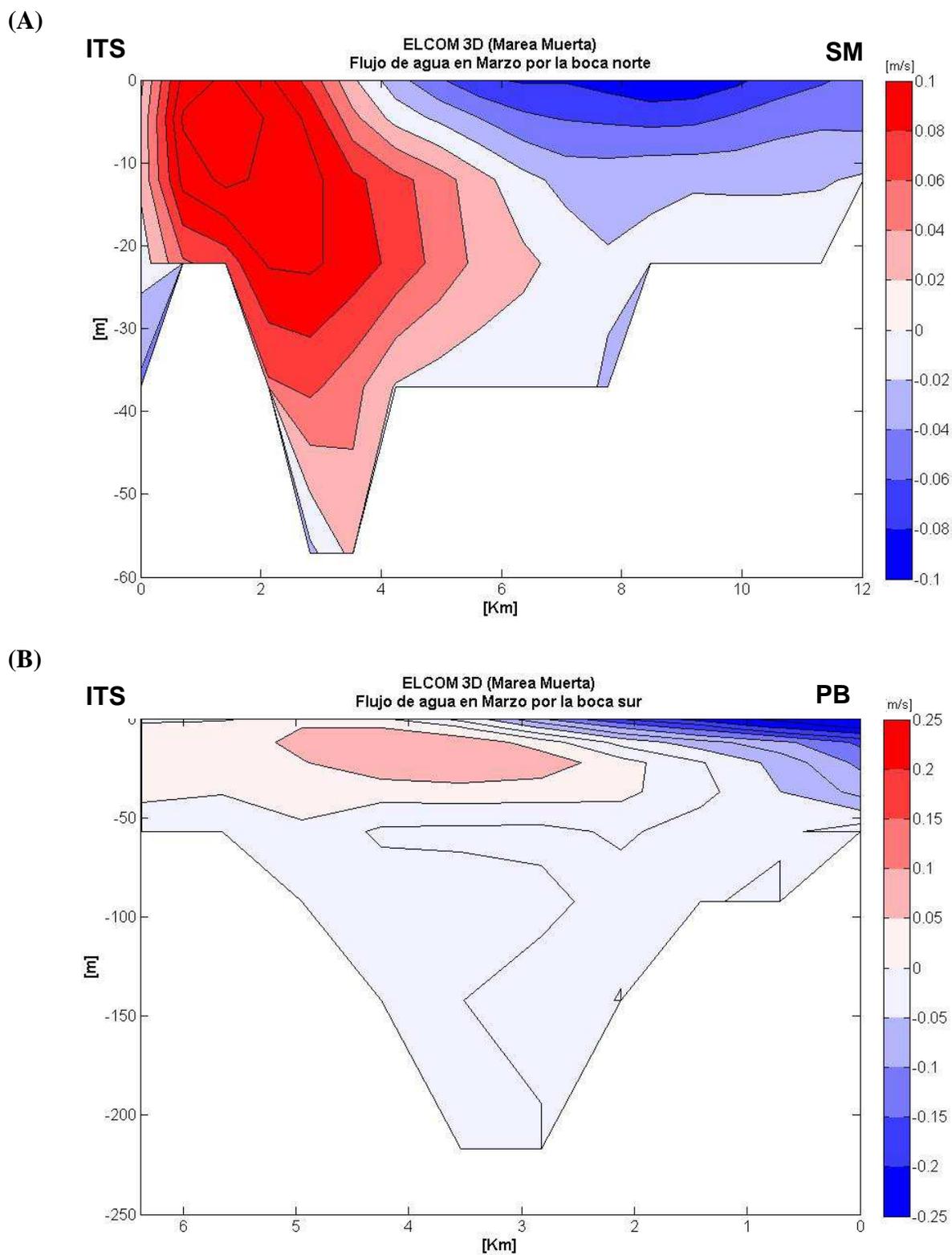


Figura 4.4.- Flujos en las bocas durante la marea muerta de la simulación de Marzo. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía.

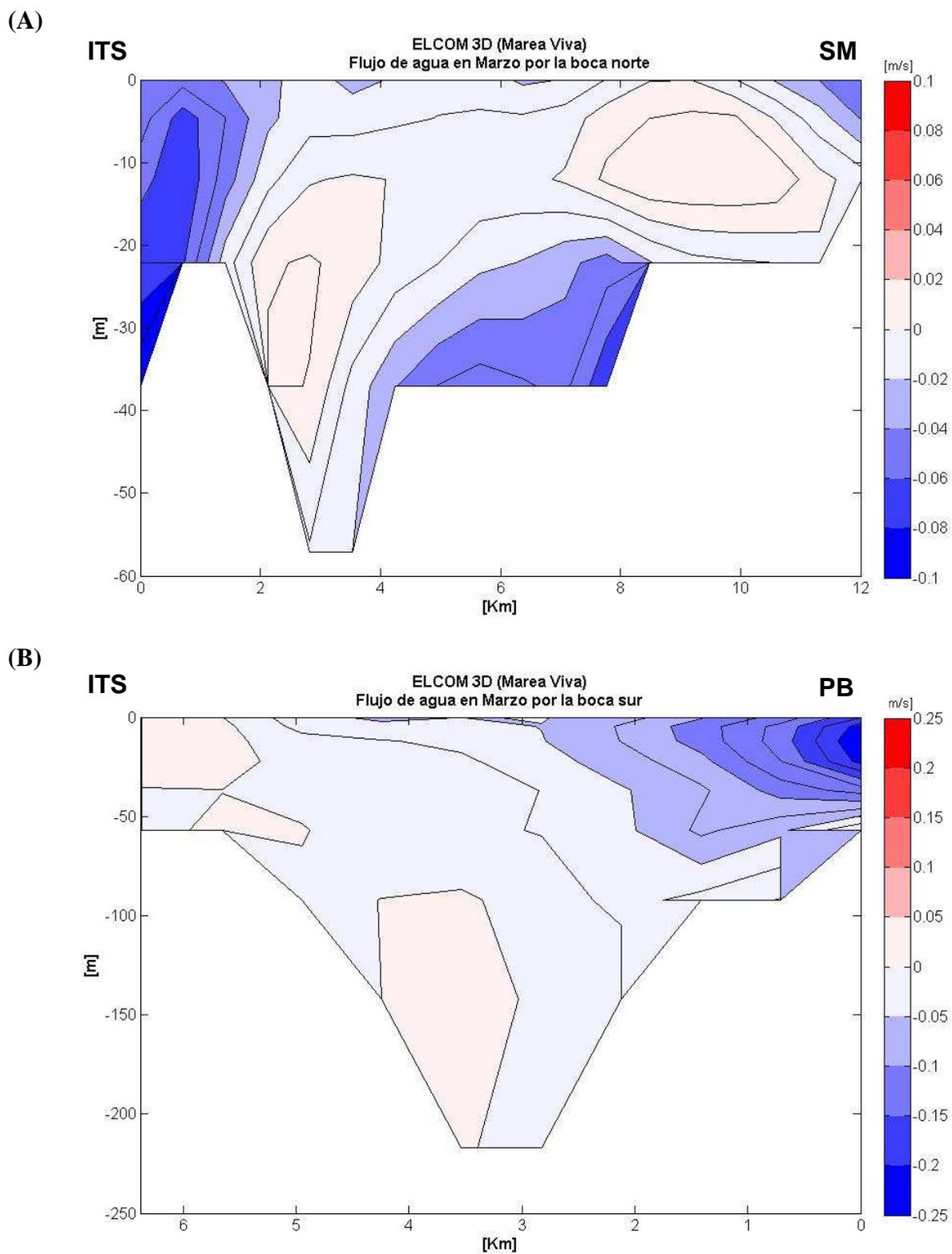


Figura 4.5.- Flujos en las bocas durante la marea viva de la simulación de Marzo. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía.

4.2. Circulación simulada en Octubre

Con la finalidad de observar la estabilidad o permanencia de los patrones estudiados durante el mes de marzo, se presenta un análisis similar para octubre.

4.2.1. Circulación superficial diurna y quincenal

En la figura 4.6 se muestran ejemplos de bajamares (Panel A y B) y pleamares (C y D) con vientos tenues. Durante el bajamar, se observó un flujo de salida por la boca norte con dirección NW, este flujo tuvo su núcleo más intenso (~ 0.20 m/s) cercano al centro de la boca norte, y transportó agua relativamente cálida (~ 13.5 °C) del interior de la BTS hacia afuera. En la boca sur se observó un flujo con la misma dirección NW que entró a la BTS en la región cercana a la ITS y además de un flujo costero de aguas relativamente cálidas (~ 13.5 °C) hacia afuera por las costas de Punta Banda.

En el caso de los pleamares, el flujo de salida por la boca norte observado en bajamar se atenuó (~ 0.1 m/s) y permitió una entrada de agua por la boca norte cercana a la ITS (Panel C y D) re-direccionando las corrientes hacia el SE (*i.e.* hacia el interior de la BTS). En la región sur se observaron corrientes con dirección W paralelas a Punta Banda que salieron por la boca sur, similar a lo observado en bajamares. Al igual que durante el mes de marzo las regiones más cálidas (14-15 °C) se encontraron en zonas cercanas al puerto de Ensenada, la playa municipal y toda la costa este de la bahía. Un resultado interesante se observó durante uno de los pleamares simulados para el día 10 de octubre, donde se identificó lo que pareció ser un remolino anticiclónico de ~ 8 km de diámetro en la región de la rada del Puerto de Ensenada, en el siguiente pleamar del 11 de Octubre, el remolino anticiclónico desapareció y se observó una atenuación de las corrientes, lo que evidencia la rápida variación (horas) inducida por las corrientes de marea que interactúa con el fondo y la línea de costa.

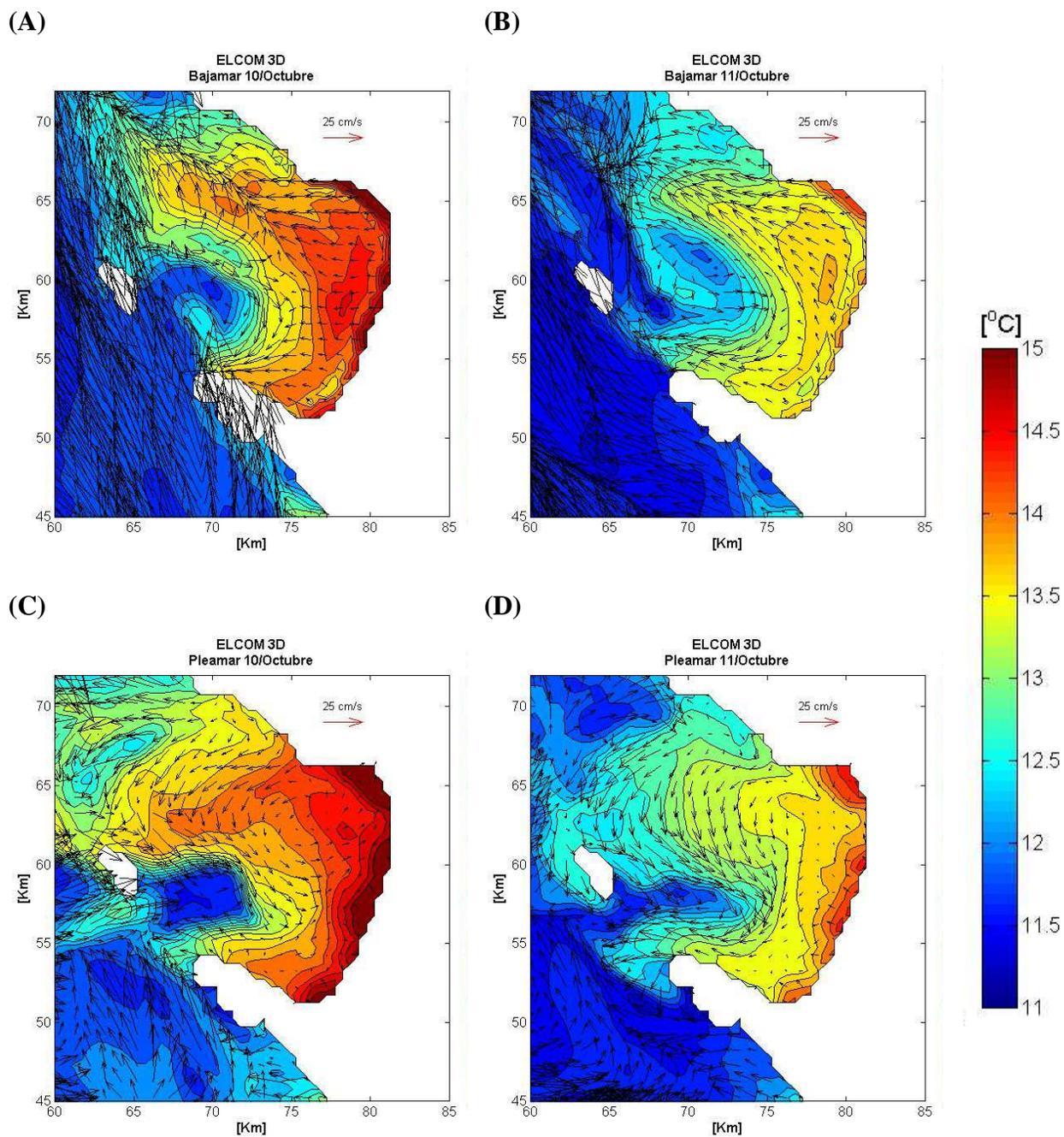


Figura 4.6.- Variación diurna de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Octubre, 2010. (A) y (B) Bajamar; (C) y (D) Pleamar.

La variación quincenal (periodo de mareas vivas y periodo de mareas muertas) de las corrientes superficiales de octubre se muestra en la figura 4.7. En los días de marea muerta (Panel A) se observaron corrientes hacia afuera de la BTS con dirección NW-W por la boca norte. En la parte central de la BTS se logró observar el remolino ciclónico cubriendo la mayor parte del área con corrientes ligeramente más intensas (~ 0.07 m/s) en la región norte y más tenues (< 0.05 m/s) en la región sur. Este remolino ciclónico podría ser un factor que mantiene el agua cálida en el interior de la BTS. De la misma forma corrientes asociadas a este remolino que salen por la región del Sauzal y San Miguel, parecen transportar agua cálida (~ 14 °C) del interior de la bahía hacia el exterior. Paralelo a las costas de la cadena montañosa de Punta Banda se observó un flujo de ~ 0.1 m/s con dirección W que sale por la boca sur.

Bajo condiciones de marea viva (Panel B) se observó un flujo de ~ 0.15 m/s hacia el NW saliendo por la boca norte, este flujo transportó agua cálida (~ 14 °C) del interior de la bahía que aparentemente proviene de la deformación de un remolino ciclónico ubicado en la porción SE de la bahía y agua fría (~ 10 °C) que proviene de una entrada de agua por la boca sur. En la boca sur se observaron corrientes más intensas (~ 0.2 m/s) hacia el N y NW. En la región contigua a Punta Banda, se observó nuevamente una salida de agua relativamente más cálida (~ 13 °C) proveniente del interior de la BTS.

La región norte de la BTS fue más cálida ($14 - 15$ °C) con corrientes más intensas (~ 0.15 m/s) que la región sur-este, donde las corrientes fueron muy tenues (< 0.05 m/s) y se observó influencia de entrada de agua fría (~ 10 °C) por la boca sur. Las regiones más cálidas ($14 - 15$ °C) fueron observadas en la costa este.

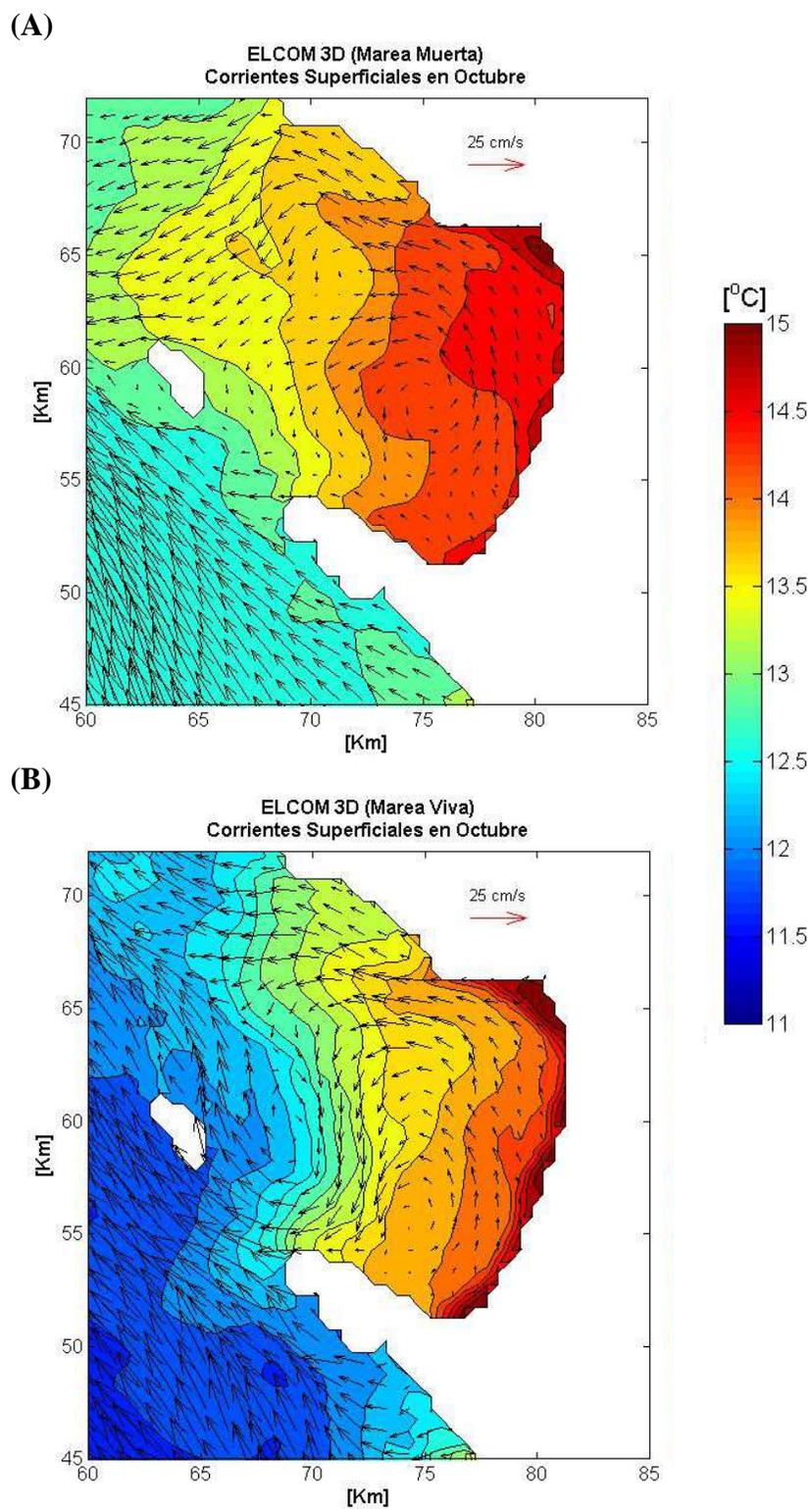


Figura 4.7.- Variación quincenal de las corrientes superficiales y temperatura superficial en Octubre, 2010. (A) Marea Muerta; (B) Marea Viva.

4.2.2. Circulación superficial residual de Octubre

La figura 4.8 muestra el flujo medio durante el mes de octubre. En octubre el remolino ciclónico observado en la simulación de marzo desapareció y dio lugar a una corriente hacia el W en la región norte (costas de San Miguel y el Sauzal), lo anterior causó un flujo de entrada superficial hacia el NW cercano a la isla por la boca sur (Península de Punta Banda). Adicionalmente, las corrientes del interior de la BTS se atenuaron casi la mitad de la velocidad en relación a las corrientes bajo condiciones del mes de marzo, especialmente en la zona costera interior (puerto de Ensenada y estero de Punta Banda).

El contraste de este flujo medio de octubre con el flujo medio de marzo, se presenta en la sección de discusiones.

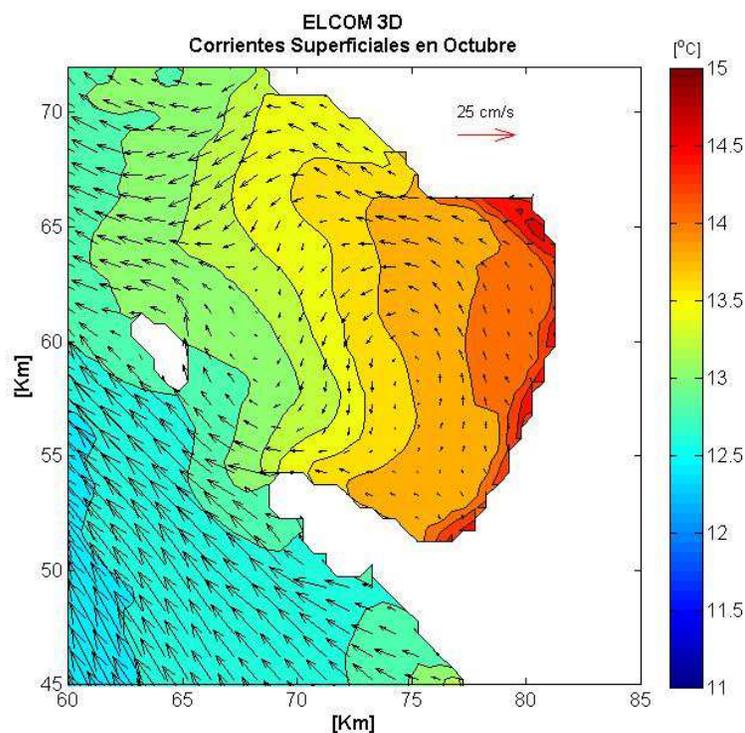


Figura 4.8.- Flujo medio de las corrientes superficiales de la simulación de Octubre.

4.2.3. Flujos de entrada por las bocas

La variación quincenal de los flujos de intercambio en octubre por ambas bocas de la bahía se muestra en las figuras 4.9 y 4.10. Las figuras se encuentran estructuradas de la misma forma que los resultados de marzo.

La figura 4.9 representa el flujo de intercambio bajo condiciones de marea muerta. En la boca norte (Panel A) se logró observar un flujo de salida (~ 0.08 m/s) cercano a las costas de San Miguel y el Sauzal desde la superficie hasta casi 10 m de profundidad. Este flujo se atenúa en la parte media del transecto hasta convertirse en un flujo de entrada con velocidades menores a 0.02 m/s cercano a la isla. Las corrientes sobre el transecto se aprecian también en la figura 4.7A en donde se encontró que una porción del flujo superficial vira hacia el exterior de la BTS y otra hacia el interior. En el área más profunda del transecto se identificó un flujo de entrada de ~ 0.02 m/s a la BTS alrededor de los 40 m de profundidad.

En la boca sur (Panel B) de la misma figura se observó un flujo de salida superficial (~ 0.2 m/s) en la zona cercana a Punta Banda que se atenuó en zonas cercanas a la isla. La figura reveló una entrada de agua en casi todo el transecto, de los ~ 20 a los ~ 60 m de profundidad. Por debajo de los 100 m predominó el flujo de salida de agua hasta la parte más profunda del cañón.

En condiciones de marea viva (Figura 4.10) se observó una dinámica distinta. La boca norte (Panel A) presentó un flujo de salida en casi todo el transecto con una velocidad relativamente mayor en la zona cercana a la Isla de Todos Santos (~ 0.05 m/s) con excepción de una zona de entrada de agua a profundidades que van de los 10 a los 20 m en una zona cercana al centro del transecto (km 4).

En la boca sur (Panel B) se volvió a encontrar un flujo de salida (~ 0.25 m/s) por Punta Banda que se atenuó del lado de la Isla (< 0.05 m/s), de igual forma en la figura 4.7 se observa que las corrientes en la boca son intensas pero paralelas al transecto, por lo que se muestran como casi nulas en la figura 4.10B. A profundidades mayores a los 100 m las corrientes se atenúan (< 0.05 m/s). En el cañón predomina un flujo de salida que es más evidente en la zona cercana a Punta Banda y un flujo de entrada en la zona cercana a la isla, sin embargo estos flujos profundos son relativamente tenues (< 0.1 m/s).

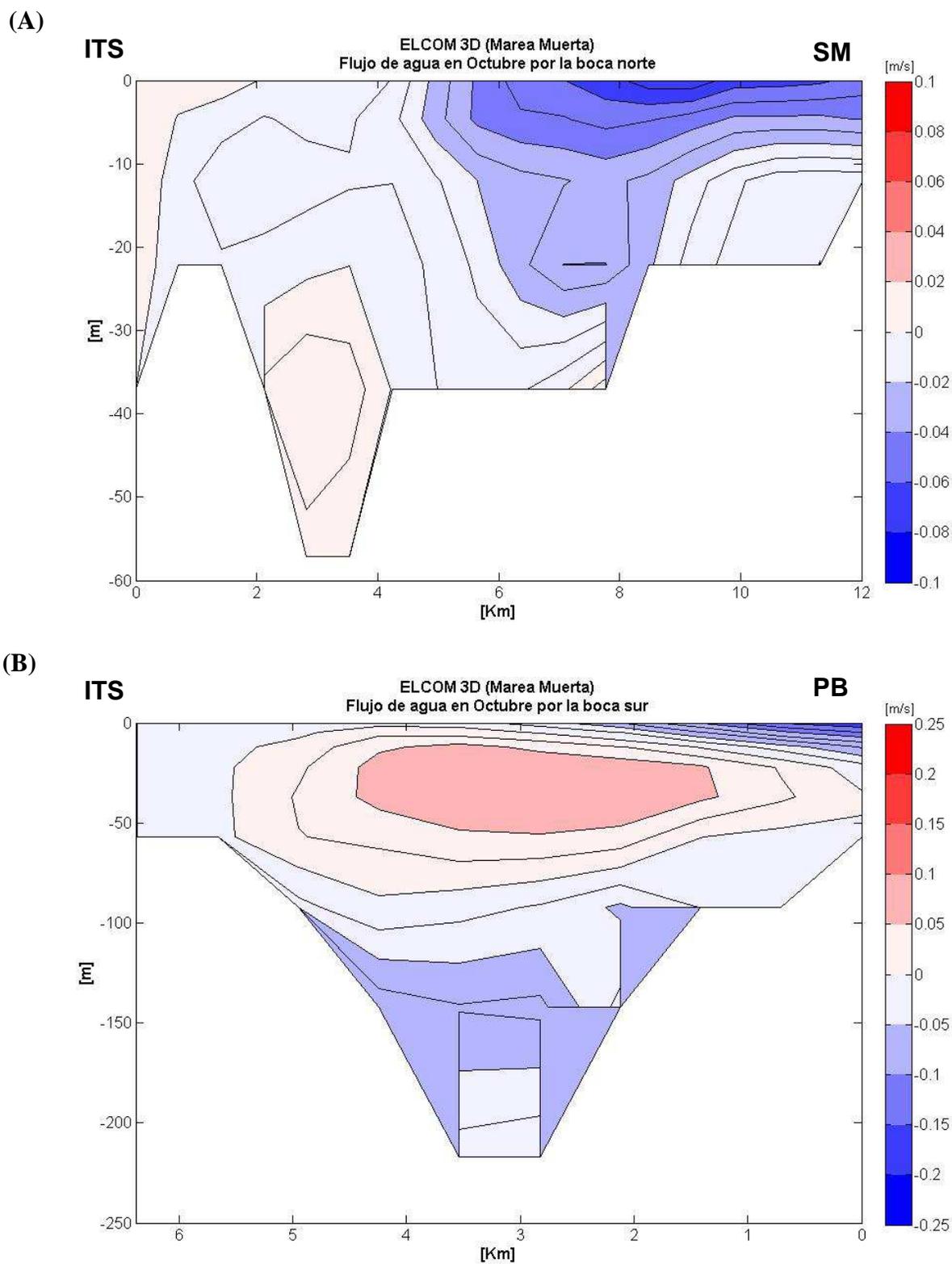


Figura 4.9.- Flujos en las bocas durante la marea muerta de la simulación de Octubre. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía.

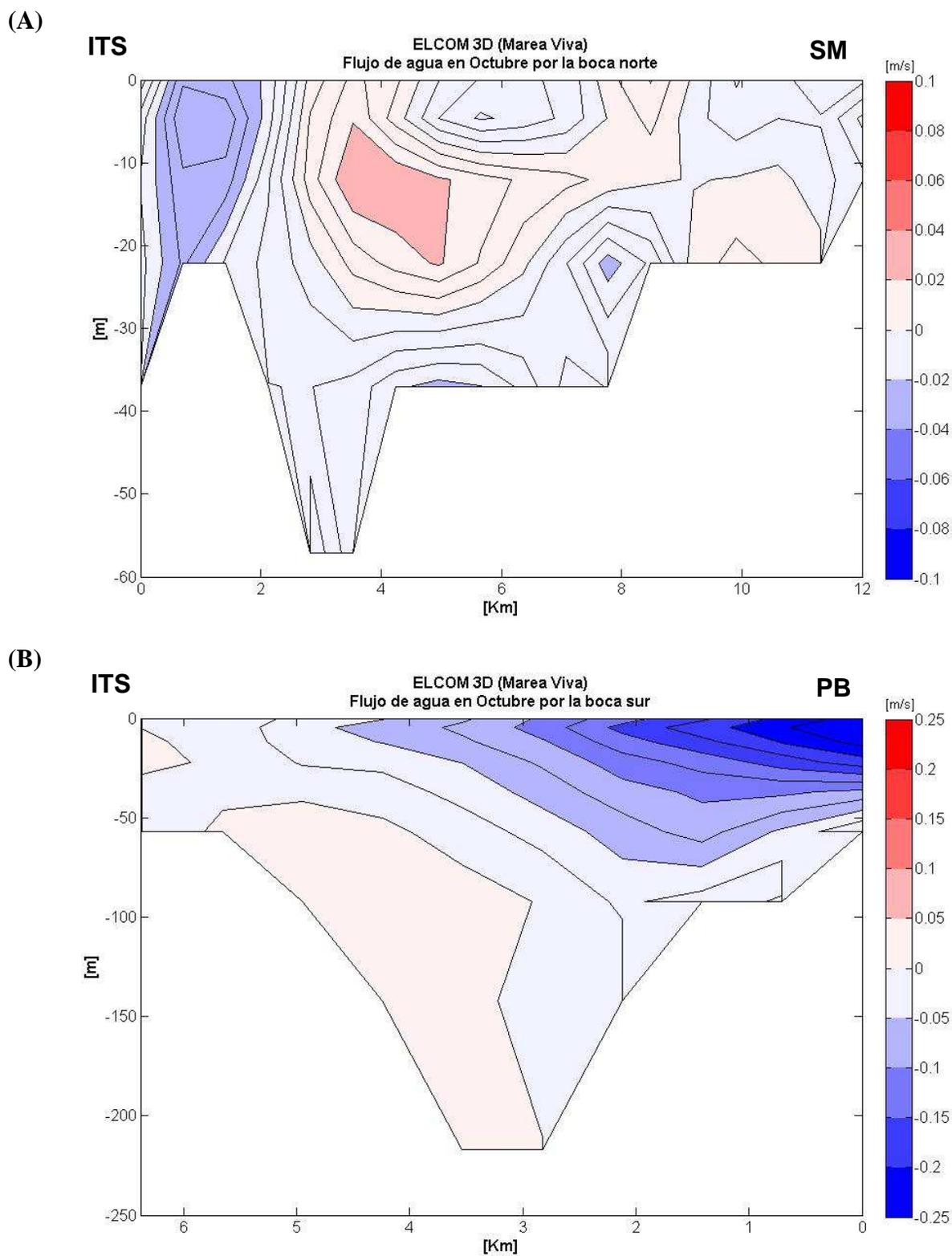


Figura 4.10.- Flujos en las bocas durante la marea viva de la simulación de Octubre. (A) Boca Norte; (B) Boca Sur. Los valores positivos (negativos) indican que la dirección de la corriente es hacia el interior (exterior) de la bahía.

5. DISCUSIÓN

A diferencia de trabajos anteriores referentes a la hidrodinámica de la BTS, el presente trabajo se enfocó en condiciones con vientos tenues para disminuir la influencia de estos y abordar el estudio desde una variación creada principalmente por la marea y diferentes condiciones meteorológicas definidas por la variación anual (temporada cálida y temporada fría).

A continuación se discuten los resultados más relevantes de este trabajo, se identifican las debilidades de los mismos y se proponen futuras líneas de trabajo.

5.1. Circulación superficial

Como rasgo predominante en la hidrodinámica de la BTS predicha por el modelo ELCOM, se observó una circulación ciclónica que cubrió casi toda la BTS en la mayoría de los escenarios estudiados. Un remolino ciclónico bien definido fue observado principalmente en marzo, en donde estuvo presente tanto en la dinámica diurna, como quincenal y flujo residual de la simulación. En octubre, la circulación ciclónica estuvo presente en la dinámica quincenal con velocidades tenues (< 0.05 m/s). El remolino ciclónico bien definido en marzo presentó una deformación en octubre debido a una corriente con dirección W casi paralela a la cadena montañosa de Punta Banda. En la dinámica diurna de octubre la circulación ciclónica no fue bien definida, en bajamares predominaron flujos de salida por la boca norte y entrada por la boca sur, mientras que en pleamares el flujo de entrada fue por la boca norte y de salida por la boca sur.

La presencia de remolinos como patrón persistente en la dinámica de la BTS fue observado desde trabajos anteriores a pesar de que en estos, el forzante principal era el viento y la influencia de la corriente de california. Usando un modelo numérico barotrópico bidimensional, Argote-Espinoza, *et al.*, (1991) encontraron que las corrientes superficiales en la BTS tienden a formar un remolino ciclónico en el sur y uno anticiclónico en la parte norte. Posteriormente estos remolinos fueron nuevamente descritos con mayor detalle por Mateos *et al.*, (2009) quienes observaron la influencia de los vientos junto con la corriente de california, caracterizó la circulación de la BTS en dos modos: el primero en un gran remolino anticiclónico en la parte N junto con un remolino más pequeño ciclónico frente al puerto de Ensenada y el

segundo con el mismo remolino anticiclónico en la parte norte pero una formación de un remolino ciclónico en la parte sur y un cambio en la dirección del remolino frente a el puerto de Ensenada (anticiclónico).

A diferencia de Mateos *et al.*, (2009), Miranda-Bojórquez (2012), basado en la orientación de elipses de variabilidad en anclajes someros en el interior de la BTS, sugirió una circulación ciclónica que sale por la boca norte similar a la reportada en el presente trabajo.

Estudiando más a detalle las corrientes superficiales simuladas por ELCOM, la variación diurna presentó patrones, en donde para la época de marzo se observó una circulación ciclónica. Durante bajamares un flujo de entrada por la boca norte salió directamente por la boca sur y solo una pequeña parte ingresó a la BTS cerca de la península de Punta Banda. Esta porción del flujo viró hacia el NW en la región de las costas de la playa municipal dando lugar al remolino ciclónico. Por otro lado, en pleamares el flujo que entró por la boca norte disminuyó en intensidad y permitió una salida de agua hacia el W, mientras que el remolino ciclónico permaneció en la región SE de la bahía. Un patrón similar fue descrito para la parte sur de la BTS por Álvarez-Sánchez, *et al.*, (1988) en el cual se mencionó que para los meses de marzo y agosto, se observó un flujo superficial predominante entrando a la BTS con dirección SE, paralelo a la costa de Punta Banda, que cambió al N como una corriente casi paralela a la barra del Estero de Punta Banda. Sin embargo, los autores no reportan la formación del remolino ciclónico.

Argote-Espinoza, *et al.*, (1991), reportaron zonas de convergencia de corrientes que fueron aparentemente inducidas por efectos topográficos. Las corrientes residuales para una condición de viento uniforme del N mostraron una zona de convergencia en el área del Puerto de Ensenada, mientras que en condiciones de viento NW, la zona de convergencia se encontró adyacente a la boca del estero. Esta misma zona de convergencia fue reportada anteriormente por Álvarez-Sánchez, *et al.*, (1988) en donde se observó como rasgo dominante de patrones a la deriva un ingreso de agua frente a las costas norte y sur de la Bahía, que continúan como una corriente paralela a la costa y convergen cerca de la boca del estero, y por Durazo-Arvizu y Álvarez-Sánchez (1988) que sugieren una zona de convergencia adyacente al Estero de Punta Banda cuando las corrientes son directamente hacia la costa. Esto nos indica una posible

influencia de la morfología de la BTS por la presencia del Estero que modifique la dinámica de la bahía.

En octubre se observaron patrones hidrodinámicos distintos tanto en la boca norte como en la boca sur. En bajamar se observó un flujo de salida de mayor intensidad por toda la boca norte, mientras que en pleamar el flujo disminuyó su intensidad y cambió de dirección a un flujo de entrada. En la boca sur se observó un flujo de salida por Punta Banda y un flujo de entrada cercano a la isla. En condiciones de octubre, para uno de los pleamares (Figura 4.6. panel C), se observó un remolino anticiclónico cercano a la rada del Puerto de Ensenada similar al reportado por Mateos, *et al.*, (2009).

En la dinámica quincenal se observó una circulación similar tanto en marzo como en octubre. Se registró nuevamente lo que aparenta ser un remolino ciclónico que cubre casi toda la bahía del cual se desprenden flujos de salida en ambas bocas. Durante marea viva, el remolino ciclónico se deformó y dio lugar a una circulación anticiclónica entre Punta Banda y la isla que se cree atenuó el flujo de salida por la boca sur y originó un flujo hacia el N que salió por la boca norte en la región adyacente a isla.

Las corrientes de mayor velocidad (> 0.15 m/s) se observaron en marzo tanto en marea viva como en marea muerta especialmente en la parte norte de la bahía. En la parte NE predominaron las velocidades más tenues (< 0.05 m/s) para esta estación del año según la variación quincenal, mientras que las corrientes más tenues de octubre se presentaron en la región SE

En general, en la costa E del interior de la BTS (Puerto de Ensenada, Playa Municipal, La Joya), las corrientes tenues (< 0.05 m/s) en ambas estaciones del año están asociadas siempre a temperaturas relativamente cálidas ($14 - 15$ °C). En marzo la temperatura del agua en el interior de la BTS disminuyó, esto podría deberse a una entrada de agua fría por la boca norte. Durante octubre, asociado a un flujo que sale desde el interior de la BTS hacia el NW, se observó transporte de agua cálida hacia el exterior. El patrón de corriente que persistió en ambas estaciones fue un flujo de salida cerca de las costas de San Miguel y El Sauzal por la boca norte y un flujo de salida por la boca sur adyacente a Punta Banda, asociado al transporte de agua caliente del interior de la BTS hacia el exterior.

Existe un enfriamiento del agua en las simulaciones debido a la falta de perfiles consecutivos suficientes para alimentar el modelo, por lo que la radiación solar sobre la capa superficial y el perfil inicial de temperatura son las únicas fuentes de calor.

5.2. Flujos en las bocas

En la boca norte, predominó una salida de agua por las costas del Sauzal y San Miguel que se atenuó conforme se acercó al fondo (20 m de profundidad), más intenso en periodos de marea muerta. El extremo subsuperficial cercano a la isla es variable. Durante condiciones de marea muerta (principalmente en el mes de marzo) se observó un flujo de entrada desde la superficie hasta las zonas profundas cercanas a la isla, mientras que en condiciones de marea viva, el flujo se atenuó y permitió una salida de agua en la región cercana a la isla.

Miranda-Bojórquez (2012), por medio de anclajes a diferentes profundidades describió un patrón de circulación con dirección sur en la boca norte hacia el interior de la bahía y reportó que únicamente el anclaje más somero (a 20 m de profundidad) mostró una salida de agua (pegada a la costa) similar al resultado de la simulación de ELCOM para el mes de marzo.

En la boca sur predominó una salida de agua por Punta Banda de ~ 0.25 m/s que se extendió por todo el canal y se atenuó en la región cercana a la isla (< 0.05 m/s). En periodos de marea muerta se formó un flujo de entrada subsuperficial entre los ~ 10 y los 50 m de profundidad. Misma región en donde se observaron las velocidades máximas de entrada (~ 0.08 m/s) en el transecto. Miranda (2012) encontró un máximo de corrientes alrededor de los 50 m de profundidad con un promedio más tenue (de ~ 0.04 m/s) que el predicho con el modelo.

Los flujos superficiales de intercambio de agua entre la BTS y el océano adyacente se lograron corroborar por las figuras de corrientes superficiales de ambas épocas del año (Figuras 4.2 y 4.7). En marzo predominó una corriente hacia afuera de la BTS por San Miguel para ambas condiciones de marea así como el flujo de salida en marea viva y de entrada en marea muerta por el lado oeste del transecto (región cercana a la isla) de la boca norte. En octubre predominaron flujos de salida a lo largo de todo el transecto norte con excepción una región entre los 10 y 20 m de profundidad, que presentó flujo de < 0.03 m/s hacia el interior.

En la boca sur bajo condiciones del mes de marzo predominó un flujo tenue (< 0.05 m/s) hacia el interior en el extremo oeste del transecto (región cercana a la isla), mientras que en octubre este flujo invirtió su dirección hacia afuera de la bahía. En general, los flujos en las zonas más profundas del cañón de la boca sur fueron tenues (< 0.05 m/s) hacia el exterior de la BTS en condiciones de marea muerta, mientras que en marea viva, el flujo de salida se inclinó hacia la parte este del cañón (hacia Punta Banda) y permitió un flujo de salida del lado oeste (hacia la isla).

5. CONCLUSIONES

Al eliminar el efecto del flujo y reflujo de la marea y durante periodos de viento tenue para los días simulados, fue posible observar el transporte neto o circulación residual dentro del sistema. La dinámica fue muy similar entre los dos meses del año con excepción de que se encontraron corrientes residuales de casi el doble de velocidad en marzo que en octubre.

En marzo predominó la formación de un remolino ciclónico que cubrió casi toda la BTS, en octubre el remolino se deformó por una corriente hacia el W por Punta Banda y las velocidades disminuyeron hasta casi la mitad en el interior de la bahía.

Una de las características hidrodinámicas que permanecieron durante toda la simulación, tanto en marzo como en octubre, fue un flujo de salida cercano a la costa del Sauzal y San Miguel por la boca norte y un flujo de salida cercano a la costa de Punta Banda por la boca sur, además de presentar las velocidades más tenues en la costa E del interior de la BTS.

La circulación cercana a la isla fue muy variable, presentó cambios en función de la estación del mes del año al igual que en función de la dinámica entre mareas vivas y mareas muertas. En la boca norte, predominó un flujo hacia el interior de la BTS bajo condiciones de marea muerta en la región cercana a la isla, por otro lado en marea viva el flujo fue hacia el exterior. En la boca sur, la dirección de la corriente fue en función de la estación del año, durante el mes de marzo el flujo cercano a la isla fue hacia el interior de la BTS mientras que en octubre predominó un flujo hacia el exterior.

En la boca sur, bajo condiciones de mareas muertas, se observó un flujo subsuperficial (entre los 10 y los 50 m de profundidad) hacia el interior de la bahía, mientras que en la parte profunda (profundidades mayores a los 100 m) la tendencia dominante del flujo fue hacia el exterior de la bahía. Bajo condiciones de mareas vivas, el flujo subsuperficial desapareció y en la zona profunda se observó un flujo de entrada en el extremo oeste (hacia la isla) y flujo de salida en el extremo este (hacia Punta Banda) de la boca sur

En condiciones de bajamar se encontraron las velocidades más intensas que produjeron flujos que atravesaron la bahía desde la boca sur hasta la boca norte y viceversa. En marzo el flujo durante los bajamares fue en dirección S-SE cruzando la bahía de norte a sur, mientras que

en octubre el flujo fue en dirección N-NW cruzando la bahía de sur a norte. En pleamar los flujos se atenuaron y se observó una entrada de agua por la boca norte y una salida por la boca sur.

Como futura línea de investigación, se sugiere la implementación de rasgos topográficos como el Puerto de Ensenada y el estero de Punta Banda. Esto con la finalidad de crear una malla de resolución más detallada que permita estudiar la posible influencia de estos cuerpos de agua (sobre todo el EPB) sobre la dinámica de la BTS. Estudios anteriores han sugerido la posible influencia de la pluma de agua de salida del EPB sobre la zona de convergencia de la BTS.

A grandes rasgos, la dinámica presentada en este trabajo sugiere una tendencia a recirculación dentro de la BTS, dicha característica tendrá que ser evaluada con estudios de tiempo de residencia (futura línea de investigación) ya que podría tener repercusiones en la calidad del agua de la BTS.

LITERATURA CITADA

Álvarez-Sánchez, L.G., 1977. Vientos en la Bahía de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*, **4**(1): 81-89.

Álvarez-Sánchez, L.G., R. Hernández-Walls, R. y R. Durazo-Arvizu., 1988. Patrones de deriva de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **14**(4): 135-162.

Argote-Espinoza, M.L., A. Amador y C. Morales., 1975. Distribución de los parámetros salinidad y temperatura y tendencias de la circulación en la Bahía de Todos Santos, BC: Ensenada, Baja California. Memorias de la primera reunión de CIBCASIO. Ensenada, México, 3-30.

Argote-Espinoza, M.L., F. Gavidia-Medina y A. Amador-Buenrostro., 1991. Wind induced circulation in Todos Santos Bay, B. C. Mexico. *Atmósfera*, **4**: 101-115.

Barrick, D.E., 2002. Geometrical dilution of statistical accuracy (GDOSA) in Multi-Static HF radar networks, CODAR report, *CODAR Ocean Sensors, Tech. Rep.* (en: http://www.codar.com/images/about/2006Barrick_GDOSA.pdf)

Castro-Osuna, D.A., 2003. Simulación numérica del oleaje en la Bahía de Todos Santos: Influencia de las condiciones de frontera. Tesis de Licenciatura. UABC, Ensenada B.C., 128.

Castro, R., A. Parés-Sierra y S.G. Marinone., 2003. Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a California y la península de Baja California. *Ciencias Marinas*, **29**(3): 275–281.

Casulli, V. y R.T. Chang., 1992. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **15**: 629-648.

Coronado, C.A., 2003. Aplicación de un modelo hidrodinámico tridimensional en el Puerto de Ensenada, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. UABC, Ensenada, B.C., 74.

Coronado, C.A., S. Czitrom, J. Imberger e I. Ramírez., 2011. Three-Dimensional Modeling of Wave-Driven Seawater Pump Inflow to the Port of Ensenada, Mexico. *Journal of Coastal Research*, **27**(6A): 172-183.

Durazo-Arvizu, R. y L.G. Alvarez-Sánchez., 1988. Cinemática de la región de la Bahía de Todos Santos, BC. *Ciencias Marinas*, **14**(1): 95-114.

Figueroa-González, J.C., 2006. Circulación superficial en la región costera de Rosarito a San Diego, utilizando radares de alta frecuencia. Tesis de Maestría. CICESE. Ensenada B.C., 81.

Hannoun, I., E.J. List, K. Bowman-Kavanagh, W. Chiang, L. Ding, A. Preston, I. Rackley y D. Karafa., 2006. Use of ELCOM and CAEDYM for water quality simulation in Boulder Basin. *Water Environment Foundation*, 3946-3970.

Hillmer, I., P. van Reenen, J. Imberger y T. Zohary., 2008. Phytoplankton patchiness and their role in the modelled productivity of a large, seasonally stratified lake. *Ecological Modelling*, **218**:49-59.

Hodges, B. y C. Dallimore., 2013. Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM. V2.2 Manual de uso. Center for Water Research, University of Western Australia., 63.

Hodges, B.R., J. Imberger, A. Saggio y K. B. Winters., 2000. Modeling Basin-Scale Internal Waves in a Stratified Lake. *Limnology and Oceanography*, **45**(7): 1603-1620.

Laval, B., J. Imberger, B.R. Hodges, R. Stocker., 2003a. Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations. *American Society of Limnology and Oceanography*, **48**(3): 983-994.

Laval, B., J. Imberger y A.N. Findikakis., 2003b. Mass transport between a semiclosed basin and the ocean: Maracaibo System. *Journal of Geophysical Research*, **108**(C7): 3234.

Leonard, B., 1991. The ultimate conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Comp. Meth. In Appl. Mech. And Eng*, **88**: 17-74.

Mancilla-Peraza, C.M., R. Castro-Valdéz, F.A. Padilla-Ozuna, G. Tablero-López, D. López-Andrés, E. Vargas-Machucho y I.V. Gutiérrez-Palacios., 2005. Variabilidad de la estructura

termohalina y circulación frente a la costa noroccidental de Baja California durante El Niño 2002-2003. Reporte técnico. SEMAR, 39.

Martínez-Díaz-de-León, A., R. Lizárraga-Arciniega y F.J. Ocampo-Torres., 2002. The usefulness of CDIP wave data further south of the U.S.-Mexican border. *Shore and Beach*, **70**(4): 2-4.

Mateos, E., S. G. Marinone y A. Parés-Sierra., 2009. Towards the numerical simulation in the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B. C., Mexico. *Ocean Modeling*, **27**: 107-112.

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, Ensenada B.C., 121.

Miranda-Bojórquez, L.E., 2012. Caracterización de las Corrientes en las entradas y alrededores de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada B.C., 57.

Oropeza-Rosales, F., 1998. Descripción del clima de oleaje para las costas mexicanas del Océano Pacífico en los estados de Baja California, Colima, Michoacán y Guerrero. Tesis de Licenciatura. UABC, Ensenada B.C., 58.

Orozco-Borbón, M.V. y S.A., Sañudo-Whilhelmy., 1987. Bacterias patógenas en sedimentos de la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, **13**(3): 31-38.

Orozco-Borbón, M.V. y F. Delgadillo-Hinojosa., 1989. Contaminación fecal en sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, **15**(1): 47-62.

Paturi, S., L. Boegman y Y.R. Rao., 2012. Hydrodynamics of Eastern Lake Ontario and the upper St. Lawrence River. *Journal of Great Lakes Research*, **38**(Supp 4): 194-204.

Pérez Higuera, R. y A. Chee Barragán., 1984. Transporte de Sedimentaos en la Bahía de Todos Santos, B.C., *Ciencias Marinas*, **10**(3): 31-52.

Ramos-Ortega, L.M., L.A. Vidal, S. Vilarity y L. Saavedra-Díaz., 2008. Análisis de contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la Bahía de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Acta. Biol. Colomb.*, **13**(3): 87-98.

Sañudo-Wilhelmy, S.A., I. Rivera-Duarte, J.A. Segovia-Zavala, M.V. Orozco-Borbón, F. Delgadillo-Hinojosa y J. Del Valle-Villorin., 1985. Estado actual de la contaminación marina en la Bahía de Todos Santos, B.C., Reporte Técnico 85-01. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada B.C., 32.

Sosa-Avalos, R., G. Gaxiola-Castro, R. Durazo y B.G. Mitchell., 2005. Efectos de los vientos Santa Ana en las propiedades bio-ópticas frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, **31**(2): 339–348.

Trasviña, A., M. Ortiz-Figueroa, H. Herrera, M.A. Cosío y E. González., 2003. ‘Santa Ana’ winds and upwelling filaments off Northern Baja California. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **37**: 113-129.

Villalba-Loera, F.A., 1980. Aplicación de un modelo numérico unidimensional de dispersión en el Estero de Punta Banda. Tesis de Licenciatura. UABC, Ensenada B.C., 43.