



Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ciencias Marinas



VALIDACIÓN DE LA HIDROGRAFIA Y CIRCULACION DEL MODELO ROMS DENTRO DE LA BAHÍA DE TODOS SANTOS

TESIS

Que para obtener el título de:

OCEANÓLOGO

Presenta:

Mireya Mercedes Montaña Orozco

Ensenada, B.C., México

Agosto, 2016

Resumen

La modelación corresponde a la rama de estudio teórico-experimental que facilita la representación, interpretación y comprensión de los procesos que se llevan a cabo dentro del complejo sistema dinámico que es el océano. Se aplicó el Modelo de Sistema Regional del Océano (ROMS) en la Bahía Todos Santos (BTS) para identificar los patrones de circulación presentes obtenidos mediante el modelo, comparar con datos observados y de esta manera identificar la influencia de la Corriente de California (CC) y los vientos sinópticos sobre la circulación dentro de la bahía. Se realizaron 3 mallas de las cuales dos fueron resultado de un anidamiento “off line” de la malla anterior. Para la validación de los datos obtenidos se utilizaron tres campañas diferentes realizadas a lo largo de la costa de California, CALCOFI (2010-2014), IMECOCAL (2011) y la realizada por la Facultad de Ciencias Marinas y la SEMAR (2010-2014). En cuanto a características hidrográficas se obtuvo que la CC es el factor influyente en la BTS; una vez validados los datos hidrográficos se obtuvieron los resultados para la circulación superficial dentro de la bahía. En las simulaciones realizadas se utilizaron vientos sinópticos, obteniéndose dos patrones de circulación, uno para otoño-invierno y otro para primavera-verano. El primero con un flujo proveniente de Punta San Miguel y presentando dos giros en el interior de la bahía, uno ciclónico y otro anticiclónico; durante el segundo el flujo cambia de dirección y el flujo de entrada de Punta San Miguel se convierte en un flujo de salida. En ambos patrones se presenta un flujo proveniente de la parte exterior con velocidades de hasta 0.30 m s^{-1} que entra a la bahía bordeando la zona interna de la Isla Todos Santos y saliendo por la sección sur. Para una profundidad debajo de los 10 m el patrón de circulación en la vertical se comporta de acuerdo a lo observado en otros estudios con velocidades aproximadas de 0.27 m s^{-1} con dirección sureste. Estos experimentos numéricos sugieren que la circulación superficial en el interior de la BTS, como lo han

mencionado autores en el pasado y debido a las dimensiones espaciales de la bahía, podría obedecer principalmente al patrón de vientos locales, es decir, al fuerte régimen de brisas de la zona y no a vientos de mesoescala.

Palabras claves: *modelación, ROMS, Bahía Todos Santos, circulación superficial, hidrografía*

Agradecimientos

A la Dra. Sorayda Tanahara Romero por su amistad y apoyo incondicional desde que empecé a forjarme como oceanólogo al ingresar a la Facultad, sin su guía, consejos y apoyo tanto dentro como fuera del aula las cosas no hubieran sido igual.

Al Dr. Rubén Castro por sus comentarios y sugerencias acerca de este trabajo y por haber sido parte importante de mi formación como oceanólogo.

Al Dr. Reginaldo Durazo que aunque no tuve el gusto de conocerlo en el aula de clases fue un fuerte apoyo en la realización de este trabajo, gracias por sus comentarios y sugerencias.

A todos los profesores de la Facultad de Ciencias Marinas que ayudaron durante mi formación, por todas sus críticas constructivas, carácter y manera de heredarnos sus conocimientos, gracias, me llevo grandes lecciones.

A esas personas que conocí durante el camino, tanto dentro como fuera del salón de clases que pasaron a ser grandes amigos y colegas, gracias por hacer este camino más entretenido.

Finalmente, a mi familia que me ha forjado para siempre ser fuerte y no dejar cosas inconclusas, por su apoyo incondicional a pesar de la distancia, gracias.

VALIDACIÓN DE LA HIDROGRAFIA Y CIRCULACION DEL MODELO ROMS DENTRO
DE LA BAHÍA DE TODOS SANTOS

TESIS

QUE PRESENTA:

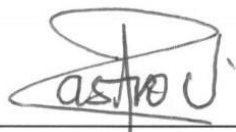
MIREYA MERCEDES MONTAÑO OROZCO

Aprobada por:



Presidente del Jurado

Dra. Sorayda A. Tanahara Romero



Sinodal Propietario

Dr. Rubén Castro Valdez



Sinodal Propietario

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu

Índice

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE	1
ÍNDICE DE FIGURAS	2
ÍNDICE DE TABLAS	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS	6
3. ÁREA DE ESTUDIO	7
4. ANTECEDENTES	8
5. METODOLOGÍA	14
5.1 ROMS	14
5.1.1 Ecuaciones	15
5.1.2 Condiciones iniciales y de frontera	16
5.1.3 Herramientas del modelo	18
5.1.4 Configuración de las simulaciones	20
5.2 VALIDACIÓN DEL MODELO	22
6. RESULTADOS	25
6.1 DIAGNÓSTICO DEL MODELO	25
6.2 HIDROGRAFÍA DE LA BAHÍA TODOS SANTOS	33
6.3 CIRCULACIÓN DE SUPERFICIE	39
6.4. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD EN LA VERTICAL	44
7. DISCUSIÓN	47
8. CONCLUSIÓN	50
9. REFERENCIAS	51
ANEXOS	54

Índice de Figuras

FIGURA 1. BATIMETRÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO. BAHÍA TODOS SANTOS (GENERADA A PARTIR DE GEBCO 30s).....	7
FIGURA 2. MALLA TIPO C ARAKAWA: (•) TEMPERATURA Y SALINIDAD, POR TANTO P, (>) COMPONENTE ZONAL DE VELOCIDAD U; (^) COMPONENTE MERIDIONAL DE LA VELOCIDAD, V.	16
FIGURA 3. EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DE COORDENADAS SIGMA OESTE-ESTE DENTRO DE LA MALLA UTILIZADA CON 30 NIVELES SIGMA. EN LA FIGURA SUPERIOR UNA AMPLIFICACIÓN DE LOS PRIMEROS 50M DE PROFUNDIDAD.	17
FIGURA 4. MALLAS UTILIZADAS EN EL MODELO, EL DOMINIO MÁS GRANDE ES LA MALLA 1, EL DOMINIO MARCADO POR “- -“ DELIMITA LA MALLA 2 Y EL DOMINIO MARCADO POR “- . “ DELIMITA LA MALLA 3. VARIABLE GRAFICADA BATIMETRÍA.	21
FIGURA 5 DOMINIO DE LA MALLA 1 Y LAS ESTACIONES UTILIZADAS DE LOS TRANSECTOS 86.7, 90.3 Y 93.3 DE LA CAMPAÑA CALCOFI Y EL TRANSECTO 100 DE LA CAMPAÑA IMECOCAL.	23
FIGURA 6. DOMINIO DE LA MALLA 3 Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES HIDROGRÁFICAS REALIZADAS DURANTE LAS CAMPAÑAS FCM-SEMAR EN LA BTS. LOS CÍRCULOS DE MAYOR TAMAÑO REPRESENTAN LOS PUNTOS SELECCIONADOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE LOS PERFILES, MIENTRAS QUE LOS DE MENOR TAMAÑO REPRESENTAN TODAS LAS ESTACIONES REALIZADAS DURANTE LOS 4 AÑOS DE OBSERVACIONES.....	24
FIGURA 7. DIAGNÓSTICO DE ESTABILIDAD DEL MODELO.....	26
FIGURA 8. COMPARACIÓN DE SECCIONES DE LAS SALIDAS DEL MODELO (8A Y 8C) DE LAS VARIABLES DE TEMPERATURA (PARTE SUPERIOR) Y SALINIDAD (PARTE INFERIOR) CONTRA LOS DATOS OBSERVADOS CORRESPONDIENTES AL LANCE 100 ESTACIONES DE LA 30 A LA 35 DE LA CAMPAÑA IMECOCAL (8B Y 8D) PARA LA LOS MESES DE PRIMAVERA (MARZO, ABRIL, MAYO).....	28
FIGURA 9. COMPARACIÓN DE SECCIONES DE LAS SALIDAS DEL MODELO (9A Y 9C) DE LAS VARIABLES DE TEMPERATURA (PARTE SUPERIOR) Y SALINIDAD (PARTE INFERIOR) CONTRA LOS DATOS OBSERVADOS CORRESPONDIENTES AL LANCE 100 ESTACIONES DE LA 30 A LA 35 DE LA CAMPAÑA IMECOCAL (9B Y 9D) PARA LA LOS MESES DE OTOÑO (SEPTIEMBRE, OCTUBRE Y NOVIEMBRE).	29
FIGURA 10. REGRESIÓN LINEAL DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LAS SECCIONES DE PRIMAVERA (10A Y 10B) Y DE OTOÑO (10C Y 10D), DEL LADO DERECHO TENEMOS LA VARIABLE DE SALINIDAD Y DEL LADO IZQUIERDO LA VARIABLE DE	

TEMPERATURA. EN LA GRÁFICA SE MUESTRA EL VALOR DE LA RAÍZ CUADRÁTICA MEDIA PARA EL CONJUNTO DE DATOS QUE REPRESENTA.....	31
FIGURA 11. DIAGRAMA T-S DE LOS VALORES OBSERVADOS DE LA CAMPAÑA DE IMECOCAL Y LAS SALIDAS DEL MODELO. SE DEFINIERON LAS FRONTERAS DE LA MASA DE AGUA ASA O ACC: AGUA SUB-ÁRTICA O AGUA DE LA CORRIENTE DE CALIFORNIA; AESS: AGUA ECUATORIAL SUBSUPERFICIAL.....	33
FIGURA 12. COMPARACIÓN DE PERFILES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA PROMEDIO DE DATOS OBSERVADOS (2010-2013) EN LA BTS CONTRA EL PROMEDIO DE CADA 5 DÍAS DE LA SALIDA DEL MODELO. A, B, C Y D CORRESPONDEN A UNA ESTACIÓN UBICADA EN LA ZONA NORTE DE LA BTS CERCANO A PSM. E, F, G Y H CORRESPONDEN A UNA ESTACIÓN UBICADA LA ZONA INTERMEDIA CERCANA AL CAÑÓN DE LA BTS. I, J, K Y L CORRESPONDE A UNA ESTACIÓN UBICADA EN LA ZONA SUR DE LA BTS CERCANA A PB, DENOMINADA C1.....	36
FIGURA 13. REGRESIÓN LINEAL DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LAS SECCIONES, DEL LADO DERECHO TENEMOS LA VARIABLE DE SALINIDAD Y DEL LADO IZQUIERDO LA VARIABLE DE TEMPERATURA. EN LA GRÁFICA SE MUESTRA EL VALOR DE LA RAÍZ CUADRÁTICA MEDIA PARA EL CONJUNTO DE DATOS QUE REPRESENTA.	37
FIGURA 14. DIAGRAMA T-S DE LOS VALORES OBSERVADOS DE LA CAMPAÑA DE BTS (NEGRO) Y LAS SALIDAS DEL MODELO, EL PROMEDIO MENSUAL Y EL PROMEDIO ESTACIONAL DEL AÑO 5 Y 6 (AZUL). 14A VALORES PARA EL MES DE MARZO, 14B VALORES PARA EL MES DE SEPTIEMBRE. SE DEFINIERON LAS FRONTERAS DE LA MASA DE AGUA ASA O ACC: AGUA SUB-ÁRTICA O AGUA DE LA CORRIENTE DE CALIFORNIA.....	39
FIGURA 15. PROMEDIO ANUAL DE LA CIRCULACIÓN DENTRO DE LA BTS; EN COLOR, LA TEMPERATURA SUPERFICIAL. ..	40
FIGURA 16. PROMEDIOS ESTACIONALES DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL Y DE LAS CORRIENTES SUPERFICIALES DE LA BTS. INVIERNO(A), PRIMAVERA(B), VERANO(C) Y OTOÑO(D).	43
FIGURA 17. RESULTADOS DE VELOCIDADES PROMEDIO (ROMS) EN LA ENTRADA NORTE Y UNA EN LA PARTE CENTRAL DE LA BTS. ISLA; CENTRO; SM=SAN MIGUEL; SMC=SAN MIGUEL COSTA; RB=RINCON DE BALLENAS (VER ANEXOS PARA UBICACIÓN).....	46

Índice de Tablas

TABLA I. ESPECIFICACIONES DEL MODELO EN LAS DIFERENTES MALLAS.....	22
TABLA II. COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE ESTACIONES UTILIZADAS COMO REFERENCIAS PARA LOS DIFERENTES EJERCICIOS REALIZADOS COMO VALIDACIÓN DE DATOS (CALCOFI, IMECOCAL, BTS) Y COMPARACIÓN DE DATOS CON RESPECTO A OTROS TRABAJOS (BTS VEL).....	54

1. Introducción

Las bahías son cuerpos de agua semi-cerrados donde la variabilidad de los parámetros oceanográficos se ve principalmente influenciada por: la morfología de la línea de costa, la configuración de la batimetría y procesos locales como mareas y vientos.

La Bahía de Todos Santos (BTS), como casi toda bahía cuyo desarrollo económico se basa en un enfoque turístico y diversas actividades antropogénicas, es una zona que se caracteriza por la explotación de sus recursos marinos. Dentro de las actividades más recurrentes de diferente ámbito e impacto que se llevan a cabo en la BTS se encuentran: el desecho de aguas residuales, dragado del puerto, arribo de cruceros turísticos, importación y exportación de productos por tránsito marítimo, y desde hace algunos años, el desarrollo de cultivos de maricultura. Por lo tanto, el conocimiento de la variabilidad de los parámetros oceanográficos en todas sus áreas es de gran relevancia para la optimización de las actividades antropogénicas que se desarrollan en la BTS.

Dentro de los estudios oceanográficos que se pueden realizar en un cuerpo de agua se distinguen tres rubros principales que son: el observacional, el teórico y el experimental. La modelación corresponde a la rama teórico-experimental esta permite estudiar de forma aislada la influencia de cada una de las variables involucradas en los procesos oceánicos. Otra de las facilidades que otorga la modelación es que permite la representación, interpretación y comprensión de los diferentes procesos físicos, biogeoquímicos y de ecosistema que se llevan a cabo en un complejo sistema dinámico como lo es el océano. Sin embargo, es importante recordar que los modelos numéricos por si solos no nos dan las respuestas que necesitamos y no sustituyen las observaciones, si no que las complementan para poder formar un argumento sólido y respaldado, por esto es necesario realizar una validación de datos que ayude a corroborar lo obtenido por un modelo numérico.

Para comprender y describir la dinámica presente en la BTS se utilizó este trabajo el Sistema de Modelación Regional del Océano (ROMS por sus siglas en inglés) el cual es un modelo numérico hidrodinámico tridimensional de superficie libre, que resuelve las ecuaciones primitivas de la circulación oceánica. Este modelo ha sido utilizado por la comunidad científica en un amplio rango de estudios como lo son: sistemas de surgencias costeras (Di Lorenzo *et al.*, 2007), calidad de sedimentos (UCLA, 2013), descargas de contaminantes por mencionar algunos. La facilidad y eficiencia de este modelo en regiones costeras y de mesoscala lo evidencian trabajos comparativos con otros modelos (Costa *et al.*, 2012). Además, ROMS incluye algoritmos numéricos y físicos eficientes y acertados, así como la disponibilidad de módulos para realizar estudios relacionados con la biogeoquímica, bio-óptica, sedimentos, oleaje, ríos y aplicaciones del hielo oceánico, esta última descrita en Budgell (2005).

El objetivo del trabajo es utilizar el modelo ROMS en la Bahía Todos Santos (BTS) y validar los resultados obtenidos con datos medidos para verificar que la implementación de este modelo es viable para nuestra zona de estudio.

2. Objetivos

- Identificar los patrones de circulación presentes en la Bahía Todos Santos obtenidos mediante modelación numérica utilizando un modelo tridimensional llamado ROMS y comparar con datos observados para validar su veracidad.
- Identificar la influencia de la CC y los vientos mensuales promedio sobre la circulación dentro de la Bahía de Todos Santos.

3. Área de estudio

La BTS (Figura 1) está localizada en la costa oeste de Baja California, ubicada a $31^{\circ}48'N$ y $116^{\circ}42'W$. Es considerada una bahía pequeña de una superficie aproximada de 230 km^2 . La BTS está conectada al océano Pacífico por dos entradas, una al norte y otra al sur, estas mismas divididas por la Isla Todos Santos (ITS). La entrada que se encuentra al norte corresponde a Punta San Miguel (PSM), tiene aproximadamente 10 km de ancho y es relativamente somera, ya que cuenta con profundidades menores a 50 metros. Mientras que, la entrada sur corresponde a Punta Banda (PB) con un ancho de 5 km y una profundidad máxima que alcanza los 400 metros debido a la presencia de un cañón submarino entre ITS y PB, sin embargo el 80% del área cuenta con una profundidad menor a 50 metros.

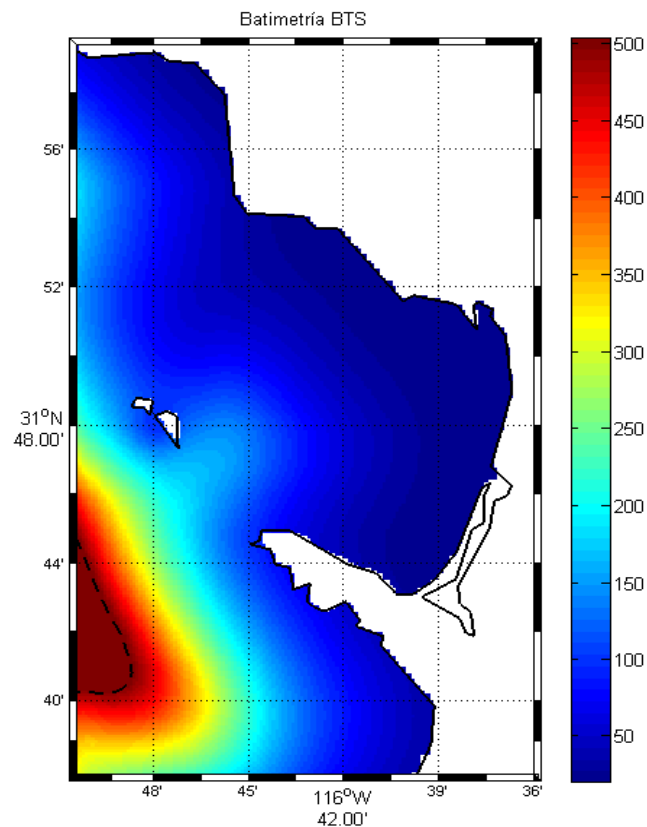


Figura 1. Batimetría del área de estudio. Bahía Todos Santos (generada a partir de GEBCO 30s).

En cuanto a la hidrografía de esta bahía se tiene que las temperaturas superficiales más altas ocurren de agosto a septiembre, con valores que alcanzan los 20 a 24°C, mientras que las más bajas tienen lugar de febrero a abril, con tan solo 12 a 14°C, con temporadas de surgencia costera durante primavera y verano (Morales-Zuñiga, 1977; Grijalva-Chon *et al*, 1985).

El forzante principal de las corrientes superficiales es el viento (Álvarez-Sánchez *et al*, 1988), predominantemente noroeste (49% de ocurrencia), aunque también se tienen vientos del oeste y oeste-noroeste, con predominancia de 18.6 y 105, respectivamente (Álvarez-Sánchez, 1977). Un último aspecto de los vientos que hay que tener en cuenta en la BTS, es la presencia de los “vientos de Santana” (vientos del este), provenientes de regiones desérticas, caracterizados por su alta temperatura y baja humedad (inferior al 10%), alcanzando velocidades hasta de 22ms⁻¹ y que se presentan entre octubre y noviembre por periodos hasta de 3 días; estos vientos pueden modificar las corrientes superficiales, surgencias costeras, así como los flujos de calor sensible y latente (Castro *et al*, 2003).

4. Antecedentes

Uno de los factores contribuyentes a la circulación oceánica en la BTS es el Sistema de la Corriente de California (SCC), que está compuesta por: la Corriente de California (CC), la contracorriente costera (IC, por sus siglas en inglés Inshore Countercurrent) y la Contracorriente Subsuperficial (CSS). La CC viaja en dirección al sureste, aproximadamente paralela a la costa, se considera superficial (0-300 m), con velocidades típicas de 4 a 12 cm s⁻¹, bajas salinidades y se localiza entre 200 y 300 km fuera de la costa (Lynn y Simpson, 1987). Es sabido que las características termohalinas del agua en la BTS corresponden a la influencia de la CC debido al intercambio de agua que ocurre entre esta corriente en la entrada norte entre PSM e ITS y PB e ITS

(Lynn y Simpson, 1987). Sin embargo, observaciones de propiedades químicas y físicas del agua de mar en la zona de Punta Banda expuesta al océano Pacífico (1998-2008) realizadas por Linacre *et al* (2010), sugieren que esta zona expuesta debiera ser usada como una zona de monitoreo de alta frecuencia, dado que es una zona de transición de aguas tropical/subtropical y el sistema subártico del sistema de la CC.

Además de la fuerte influencia de la corriente de California sobre la circulación dentro de la BTS contamos con otros dos procesos locales de alto impacto sobre este proceso: el viento y las mareas. En cuanto al viento tenemos que la circulación atmosférica a lo largo de la costa de Baja California está influenciada por la posición y la intensidad del centro de alta presión del Pacífico Norte, que emigra estacionalmente de sur (Febrero) a norte (Agosto) (Castro *et al.*, 2003). Particularmente en Baja California, la cadena de montaña hace que el viento sea paralelo a la costa durante el día y por la noche el aire frío de las montañas fluya hacia el mar, sistema conocido como régimen de brisas. Existe una marcada dominancia de la dirección Noroeste y es especialmente constante en los meses cálidos del año, correspondientes a la temporada de verano (Julio-Septiembre) (Álvarez-Sánchez, 1977). La mayor diversificación de las direcciones se da en otoño e invierno, lo que puede atribuirse a la ausencia de la baja presión, antes mencionada, al Noreste de Baja California (Álvarez-Sánchez, 1977). También hay presencia de eventos de vientos esporádicos con dirección este-noreste de corta duración (2-3 días) con baja humedad y alta temperatura denominados vientos Santa Ana, estos se presentan entre las estaciones otoño-invierno (Álvarez-Sánchez, 1977; Castro *et al.*, 2006).

En el puerto de Ensenada la marea es tipo mixta semidiurna, es decir se registran dos pleamares y dos bajamares al día. En un ciclo anual, los niveles de mar más altos se presentan durante el verano; mientras que los más bajos suceden durante el invierno. La pleamar media superior es de

aproximadamente 1.61 m (referido al Nivel Bajamar Media Inferior) y la pleamar máxima registrada es de 2.32 m y el nivel medio del mar de 0.81 m (SEMAR).

Los estudios realizados en la BTS son escasos comparados con otras zonas en México como el Golfo de California, el Golfo de México, la Bahía de Campeche y el Golfo de Tehuantepec. Entre los trabajos existentes tanto observacionales como numéricos que han proporcionado conocimiento acerca de la circulación superficial en esta bahía destacamos los de Álvarez-Sánchez (1971), Argote *et al* (1981), Álvarez-Sánchez *et al.* (1988), Torres *et al.* (2006); Mateos *et al.* (2009); Rivas *et al.* (2010), Cervantes-Audelo, (2013), Marinone y Mateos (2013), Larrañaga-Fu (2013), y Flores *et al* (2015), entre otros.

Uno de los primeros estudios observacionales llevados a cabo en la BTS fue el de Álvarez-Sánchez (1971), quien propuso que las corrientes locales en la bahía son producto de las mareas, el viento local y las corrientes existentes a lo largo de la costa de Baja California.

Las mediciones directas de las corrientes han sido escasas, el primer trabajo realizado fue publicado en los 80's realizado por Barton (1984), quien estudió las corrientes de la BTS por medio de un anclaje al norte de BTS entre la ITS y PSM. Con tan solo un año de datos determinó que el promedio de las corrientes era menor que el de las variaciones, y que las corrientes se orientaban paralelas a las isobatas, pero no encontró una relación clara entre las corrientes y el viento local.

En 1988 Álvarez-Sánchez *et al* realizaron un trabajo más completo utilizando trazadores lagrangeanos. Este estudio fue realizado entre 1980 y 1986, fue de los primeros estudios que reportan un patrón de circulación en el interior de la BTS, cuyas corrientes superficiales alcanzan velocidades de $\sim 15 \text{ cm s}^{-1}$ en la zona sur de la bahía en temporadas de verano, y de $\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$

durante otoño e invierno (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988). El patrón de circulación promedio obtenido consistió en flujos de agua hacia dentro de la bahía frente a las costas de Punta San Miguel y la Península de Punta Banda y corrientes paralelas a la costa que convergen cerca de la boca del Estero de Punta Banda, haciendo la formación de un giro ciclónico en la región sur y uno anticiclónico en la región norte, producto de la influencia de vientos provenientes del norte. Además observaron que en la mayoría de las trayectorias la dirección del flujo estaba siendo influenciado por la morfología costera. Un estudio más detallado fue llevado a cabo por Durazo y Álvarez-Sánchez (1988) en el suroeste de la bahía (de Punta Banda hasta la boca del estero de Punta Banda), encontrando una corriente paralela a la costa que fluye hacia fuera de la bahía siguiendo la Punta Banda, y otra que va desde Punta Banda hasta la boca del estero.

Recientemente Miranda (2012) presentó el primer estudio de larga duración de las corrientes en la BTS y sus alrededores usando datos de perfiladores acústicos Doppler anclados al fondo. En este trabajo se reportó que el viento local se relaciona sólo con las corrientes en la entrada norte y en la superficie del cañón a las frecuencias de 0.17 y 0.3 cpd. También hubo evidencias de que el gradiente de presión a lo largo de la costa está relacionado con las corrientes en la superficie y a 150 m en el cañón, siendo importante en la intensificación hacia el norte de la contracorriente subsuperficial. Asimismo, reportó que el patrón de corrientes medias en ambas entradas de la BTS muestra que el agua entra por la entrada norte y que hay un flujo de salida neto por la sección del cañón.

En el 2012, se realizó un proyecto interno por parte de la UABC con el nombre de Circulación estacional en la Bahía Todos Santos (Durazo *et al.*, 2012) donde se utilizaron radares HF y boyas de deriva para la medición de la circulación superficial. Se reportó que las corrientes superficiales son más intensas en las zonas costeras de Punta Banda y El Sauzal-Punta Morro; además de que

los datos obtenidos sugieren una zona de calma (retención frente a la Playa Municipal y la Barra del Estero). Entre los trabajos más recientes encontramos el realizado por Larrañaga (2013), quien realizó una caracterización de la estacionalidad de la circulación superficial utilizando los datos de radares HF, y el de Flores et al (2015), quienes explican la importancia de vientos sinópticos de pequeña escala provenientes del norte y noroeste, los cuales inciden en la zona sur de la bahía y no en la norte, debido a la orografía presente en la región generando una circulación promedio ciclónica en el interior de la BTS.

Los modelos numéricos han tenido un rol importante en el estudio de las corrientes en la BTS. Gavidia (1988) y Argote *et al* (1991), utilizando un modelo barotrópico bidimensional, coinciden en que las corrientes de marea tienen poca influencia en la circulación de la BTS. Así mismo, forzando modelos numéricos con viento proveniente del noroeste, encontraron que las corrientes superficiales tienden a formar un giro ciclónico en el sur de la bahía y anticlónico en el norte, esto coincide con lo reportado por Alvarez-Sánchez *et al* (1988) antes mencionado. Estudios en modelación mas recientes han sido llevados a cabo utilizando el modelo ROMS, tanto por Mateos *et al.* (2009), Rivas *et al* (2010), y Marinone y Mateos (2013).

Mateos y colaboradores (2009) obtuvieron sus datos para el forzamiento del Atlas Mundial del Océano (WOA) especificando los campos de temperatura y salinidad de la climatología del mes de Julio en todas las fronteras, vientos y temperaturas superficiales fueron obtenidos de QuikSCAT y Pathfinder respectivamente, la topografía fue obtenida de ETOPO2 corregida con mediciones de la BTS para la malla hija. En este estudio dividieron la bahía en dos sistemas, para definir los patrones de circulación, el sistema exterior a la BTS cercano a la ITS y el sistema interior dentro de la BTS. Proponen que esta circulación cuenta con un flujo intenso hacia el sur del SCC que rodea la ITS dentro de la bahía proveniente del Noroeste. También proponen que la circulación del

sistema interior consiste de fluctuaciones de remolinos anticiclónicos (AC) y ciclónicos (C) con magnitudes de velocidad menores a las encontradas en el sistema exterior $\sim 8\text{cms}^{-1}$. El giro AC se encuentra al norte y cuenta con aproximadamente 10 km de diámetro y un flujo costero intenso que se separa de la costa hacia el centro de la BTS, cerca del sistema exterior el flujo de este giro se incorpora al flujo exterior. Mientras tanto el giro C es más débil con velocidades aproximadas de 2cms^{-1} y chico en comparación con el giro AC con un diámetro de 5 km, este se encuentra en la parte sureña de la BTS en frente del estuario de PB. Ambos giros ocupan casi toda la columna de agua.

En cuanto a la temperatura promedio, los mismos autores (Mateos *et al.*, 2009) mencionan en el texto que en la zona interior a la bahía, la temperatura en la columna de agua se encuentra bien mezclada los primeros 10m, y que esta capa de mezcla va aumentando de la sección norte hacia PB. Mientras que en el sistema exterior (SCC), esta homogenización se extiende en los primeros 30 metros de profundidad, debajo de estos 30 metros la estratificación de la columna es evidente.

Finalmente, muestran dos patrones de circulación en la bahía que oscilan entre uno y otro. Uno consiste en un gran giro AC dominando toda la BTS, y el otro de dos giros de circulación contraria. El primer patrón cuenta con un periodo de dos-tres días mientras el segundo patrón un periodo de tres-cuatro días. En ambos patrones se observa una clara separación entre el sistema exterior y el interior, donde el exterior se encuentra confinado a la zona profunda y presenta velocidades mayores. Mientras tanto el sistema interior presenta características como: apilamiento de agua cercana al estero de PB, y una estructura de temperatura que muestra una homogeneidad en la parte superior de la columna ($<10\text{ m}$) con un gradiente latitudinal, debajo de esta capa la columna de agua muestra una estratificación vertical sin gradiente en la horizontal.

Marinone y Mateos (2013) se enfocan principalmente en la circulación profunda cercana al cañón en la entrada sur de la BTS. En este estudio utilizaron como condiciones de frontera salidas de modelos para el océano mundial con asimilación de datos (SODA, por sus siglas en inglés Simple Ocean Data Assimilation) que cuenta con una resolución horizontal de 0.5° , los flujos de agua dulce y calor estacional fueron obtenidos a partir de datos de Océano-Atmosfera (COADS por sus siglas en inglés Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set), en tanto que para el forzamiento de viento se incorporan al modelo datos de Re análisis Regional Norte Americano (NARR, por sus siglas en inglés). Los resultados numéricos sugieren un flujo de salida neto a través de la boca sur de la BTS, mismo que fue reportado por Miranda (2012), como parte de un giro anticiclónico.

5. Metodología

5.1 ROMS

ROMS es un modelo tridimensional de superficie libre que resuelve un sistema de ecuaciones que contiene las ecuaciones primitivas (Navier-Stokes) (1a, 1b), la ecuación de conservación de temperatura (2) y salinidad (3), la ecuación de estado para el agua de mar IES80 (4) y la ecuación de continuidad (5). La resolución de este sistema de ecuaciones en el modelo ROMS se resuelve bajo las siguientes hipótesis principales:

- **La aproximación hidrostática** (6). Esta reduce la ecuación de movimiento de la componente vertical a un equilibrio entre la fuerza de presión y la fuerza de gravedad.
- **La aproximación de Boussinesq**. Considera que las variaciones de densidad son insignificantes, por lo tanto se utiliza un valor de densidad de referencia que reemplaza el parámetro ρ en las ecuaciones de movimiento con excepción en el término de gravedad.

- **El enfoque de Reynolds.** Este permite el cierre de la turbulencia mediante la introducción de los conceptos de flujo promedio y coeficientes de viscosidad turbulenta A_x, A_y, A_z .
- **La hipótesis de turbulencia horizontal isotrópica.** Esta afirma que los coeficientes de viscosidad turbulenta horizontales son iguales ($A_x + A_y = A_h$)

5.1.1 Ecuaciones

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (1b)$$

dónde:

- El primer término representa la variación local de la velocidad y los siguientes tres son los términos advectivos, seguidos del término del gradiente de presión y la fuerza de Coriolis, debido a la rotación terrestre.
- u, v y w son las componentes verticales y horizontales de la velocidad, componentes promedio.
- f es el parámetro de Coriolis.
- P es la presión y ρ_0 es la densidad de referencia del agua de mar, justificada de acuerdo con la hipótesis de Boussinesq ($1025.00 \text{ kg m}^{-3}$).
- Los últimos dos términos de las ecuaciones son los términos asociados al flujo turbulento (viscosidad turbulenta para el cierre de turbulencia). A_h corresponde al coeficiente turbulento en la horizontal (hipótesis de turbulencia horizontal isotrópica) y A_v corresponde al coeficiente turbulento en la vertical.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_h \nabla_h^2 T + A_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho C_p} \frac{\partial l}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_h \nabla_h^2 S + A_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (3)$$

Dónde:

- Q_c es el flujo de radiación solar incidente
- C_p coeficiente de calor específico
- $I(z)$ es la fracción de este flujo que llega al nivel/profundidad z

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (4)$$

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (5)$$

$$0 = \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g \quad (6)$$

5.1.2 Condiciones iniciales y de frontera

La discretización espacial se hace para la horizontal y la vertical de manera diferente. En la horizontal se utiliza una malla tipo C de Arakawa que optimiza la conservación de masa (Figura 2), mientras que en la vertical se realiza en base a coordenadas sigma (Figura 3).

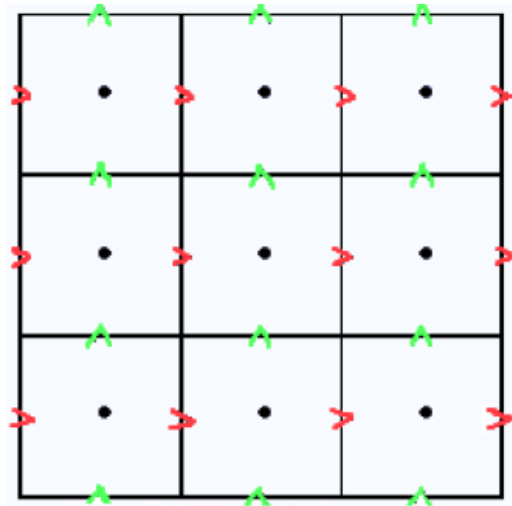


Figura 2. Malla tipo C Arakawa: (•) Temperatura y salinidad, por tanto ρ , (>) Componente zonal de velocidad u ; (^) componente meridional de la velocidad, v .

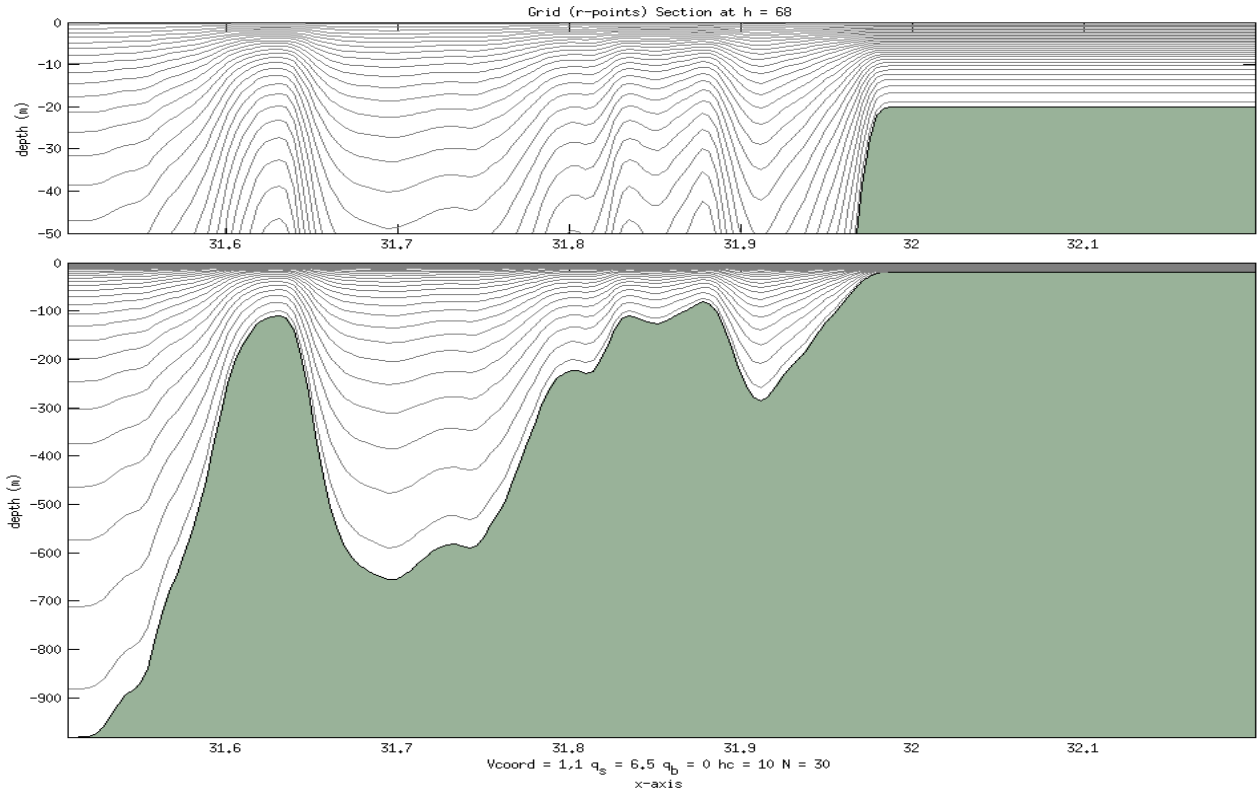


Figura 3. Ejemplo de distribución de coordenadas sigma oeste-este dentro de la malla utilizada con 30 niveles sigma. En la figura superior una amplificación de los primeros 50m de profundidad.

En cuanto a la discretización temporal se utiliza el método de separación de tiempos (“time splitting”) para correr el modelo, ya que el intervalo de tiempo se encuentra restringido por las ondas internas y externas de gravedad. Este método requiere un tratamiento especial de acoplamiento “time-splitting” entre los modos barotrópicos (rápido para 2D, ecuaciones para aguas someras) y baroclínicos (lento para 3D, ecuaciones primitivas bajo la aproximación de Boussinesq). En el algoritmo del modelo, la superficie libre y las ecuaciones de momento verticalmente integradas, son calculadas en un número finito de pasos de tiempo barotrópico (NDTFAST) dentro de cada paso de tiempo baroclínico (dt), pero al final, los perfiles deben ser coherentes.

La condición de estabilidad entre la discretización espacial y la temporal se establecen mediante el criterio de estabilidad tipo CFL (Courant-Friedrichs-Levy)(7).

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[\frac{1}{dx^2} + \frac{1}{dy^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Donde Δt es el paso de tiempo del modo barotrópico, c la celeridad de las ondas externas y dx y dy el incremento espacial de la malla. El criterio implica que el tiempo debe respetar la ecuación (7), de otra manera, la simulación producirá resultados incorrectos (aliasing), es decir, la rapidez del cálculo debe ser superior a la celeridad de propagación de las ondas de gravedad.

5.1.3 Herramientas del modelo

Implementación y preparación del modelo:

La utilización del modelo ROMS, cuyo código está escrito en lenguaje de programación Fortran se lleva cabo a través de una herramienta numérica llamada Roms_tools, que es un script de Matlab, que permite la configuración de la simulación numérica (“pre procesamiento”), la visualización de los resultados (“cálculos diagnósticos”) y algunos cálculos dinámicos (“pronósticos”) de los resultados de la simulación. Los tres directorios principales son:

- Run: este está definido como el directorio de trabajo. Aquí se encontrarán los scripts que permitirán definir los parámetros que se considerarán para la simulación. Dentro de este directorio los principales scripts son:
 - romstools_param.m: donde debe ser modificada la información (título, posición, resolución, fronteras, condiciones iniciales y de frontera, así como forzamiento y módulos que deseen incorporarse en una corrida);
 - param.h: debe contener de manera precisa la definición del dominio y el establecimiento de parámetros de la malla (LLm, MMm y N);

- `cppdefs.h`: se define la nueva configuración del dominio a modelar, mediante un activado/desactivado de subrutinas y/o módulos, y se verifica que las fronteras permanezcan abiertas en las direcciones correctas para la simulación.
- `Preprocessing_Tools`: Modulo utilizado para calcular las mallas de inicialización y forzamientos en la simulación deseada. Los principales scripts son:
 - `make_grid.m`: Genera la malla espacial donde se llevarán a cabo los cálculos (horizontal: LLm, MMm), así como `dxmin`, `dymin`, `dxmax`, `dymax` y `Hmax`.
`Make_grid` proporciona también la batimetría del dominio ajustada al tamaño de malla elegido;
 - `make_forcing.m`: Obtiene las mallas para los forzamientos atmosféricos, flujos de calor, y agua dulce, así como vientos;
 - `make_clim.m`: proporciona los datos para las condiciones iniciales y condiciones laterales para las fronteras abiertas (FA: T, S, SSH y corrientes).
- `Visualization_tools`: en este directorio se encuentran los scripts de Matlab para la interfaz de visualización gráfica de ROMS.
- `Diagnostic_tools`: algunos scripts de Matlab utilizados para animación y análisis estadísticos básicos (“cálculos diagnósticos”).
 - `roms_diags.m`: Script que nos permite verificar el correcto funcionamiento del modelo. Genera series de tiempo de variables como: energía cinética, volumen total, salinidad, temperatura y volumen de la anomalía para así poder realizar un

diagnóstico del modelo. También para verificar que este ha llegado a una estabilidad.

5.1.4 Configuración de las simulaciones

En esta sección se expone la manera en que el modelo fue configurado. Se utilizó la última versión ROMS_AGRIF que cuenta con una paquetería que permite realizar configuraciones anidadas mediante el uso del módulo AGRIF.

Se elaboraron tres mallas durante el proceso, de las cuales la segunda y la tercera fueron resultado de un anidamiento offline en un sentido (Tabla I). Se denominaron como: Malla 1, siendo está la malla de mayor dominio, Malla 2 resultado de un anidamiento realizado de la Malla 1 y finalmente la Malla 3 resultado de un anidamiento realizado de la Malla 2 (ver Figura 4).

Para las condiciones iniciales de la simulación se utilizaron datos de WOA (World Ocean Atlas) y para el forzamiento climatológico se utilizaron datos de COADS05, climatología que contiene promedios mensuales de forzamientos atmosféricos, flujos de calor y agua dulce, así como esfuerzo de viento. La topografía utilizada fue de la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO por sus siglas en inglés, General Bathymetric Chart of the Oceans) con una resolución espacial de 30". Para las fronteras abiertas de la Malla 1 se utilizaron datos de una corrida estable de UCLA para toda la Corriente de California. Para las condiciones iniciales y fronteras de la Malla 2 y 3 se realizó un anidamiento offline de un solo sentido, lo que significa que fueron alimentadas de la información de la Malla 1 y Malla 2 respectivamente.

En el modelo ROMS-AGRIF, la creación de mallas anidadas se lleva a cabo mediante 'Nesting_tools' en la biblioteca de Roms_tools, sin embargo investigadores de UCLA han desarrollado otro paquete de herramientas llamado R2R (Mason *et al.*, 2010) para llevar a cabo el

anidado. Este paquete al igual que la paquetería de Nesting_tools, genera los archivos necesarios para elaborar un subdominio llamado “malla hija” que se ajusta dentro de una área mayor llamada “malla madre”. La preparación de los datos para la malla hija se logran a través de una serie de interpolaciones de datos provenientes de la malla madre. La razón por la que se utiliza las herramientas de R2R es debido al tipo de anidamiento realizado “off line”.

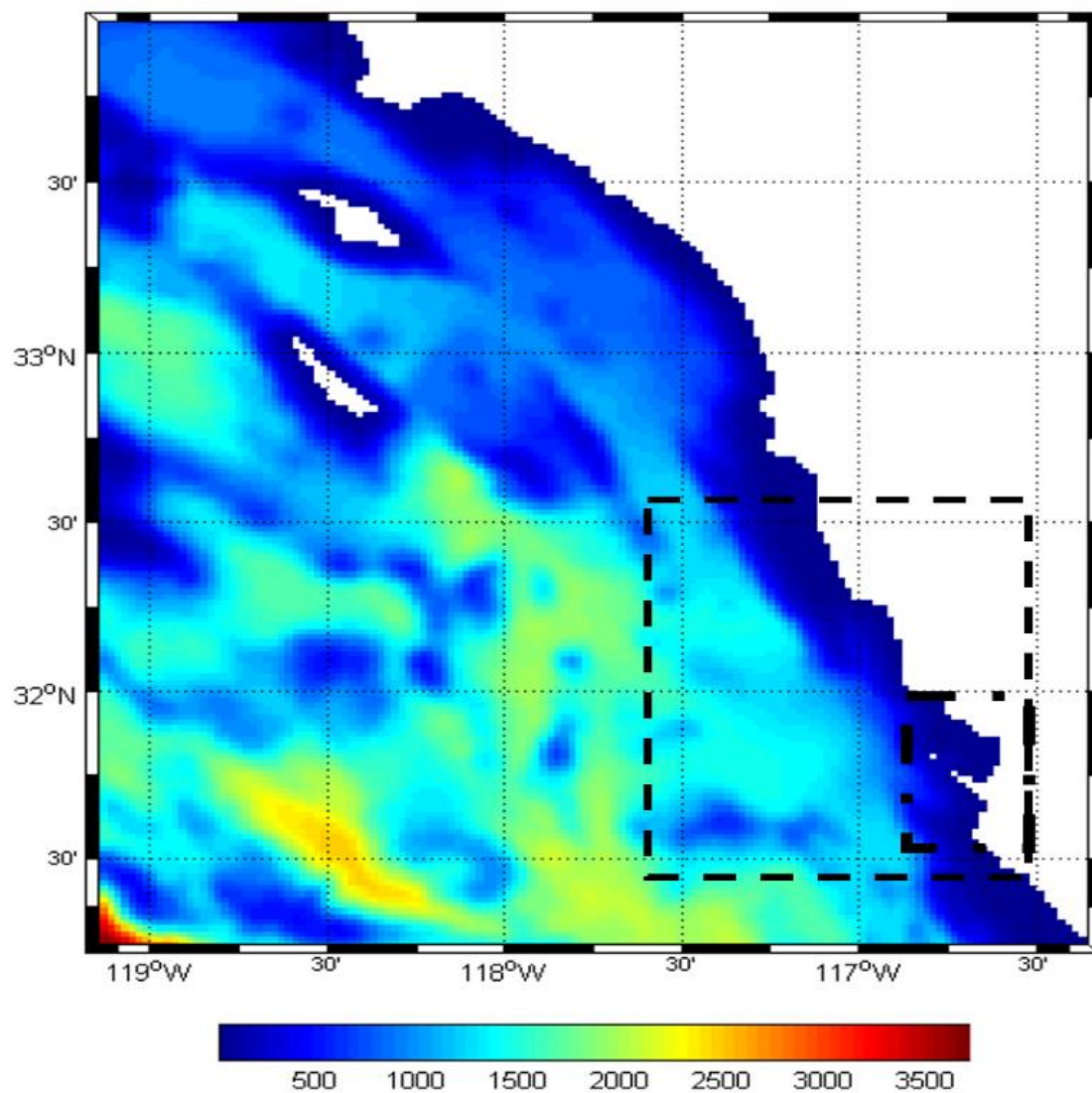


Figura 4. Mallas utilizadas en el modelo, el dominio más grande es la Malla 1, el dominio marcado por “- -” delimita la Malla 2 y el dominio marcado por “- . -” delimita la Malla 3. Variable graficada batimetría.

Tabla I. Especificaciones del modelo en las diferentes mallas.

Variables			Malla 1	Malla 2	Malla 3
Coordenadas Geográficas	Longitud	Max.	-116.3	-116.6	-116.6
		Min.	-119.2	-117.6	-116.8
	Latitud	Max.	34	32.5	32
		Min.	31.2	31.45	31.6
Resolución (°)			1/50	1/200	1/600
Dx y Dy			1.8 km	0.450 km	0.150 km
Fronteras	N		Abierta	Abierta	Cerrada
	S		Abierta	Abierta	Abierta
	E		Cerrada	Cerrada	Cerrada
	O		Abierta	Abierta	Abierta
Duración			10 años	10 años	6 años
Dt			360 seg	120 seg	60 seg
Dimensiones de la malla	Ll		144	120	150
	Mm		166	148	255
Niveles (N)			30	30	30

5.2 Validación del modelo

Para la validación de la hidrografía generada por el modelo se utilizaron datos observados¹ de tres diferentes programas y/o proyectos oceanográficos, los cuales se compararon con los datos promediados cada 5 días, mensuales y estacionales de los últimos dos años de la corrida (el año 5 y 6). Las diferentes campañas utilizadas fueron:

- California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CALCOFI), de los cuales se utilizaron los valores estacionales promedios del periodo comprendido entre 2010 a 2014 de los lances 86.7 (estaciones 33- 40), 90 (estaciones 27.7-45) y 93 (estaciones 26.7-55) (Figura 5).

¹ Revisar Anexos para la tabla de las coordenadas geográficas de las estaciones utilizadas

- El Proyecto de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), de los cuales se utilizaron los valores estacionales de la campaña realizada durante 2011 del lance 100 estaciones 30, 32 y 35 (Figura 5).
- Crucero oceanográfico dentro de la Bahía Todos Santos realizado por la Facultad de Ciencias Marinas en conjunto con la Secretaría de Marina (FCM-SEMAR) durante Marzo y Septiembre de 4 años diferentes (2010,2011, 2012 y 2013), de los cuales se utilizaron los valores promedios estacionales (Figura 6).

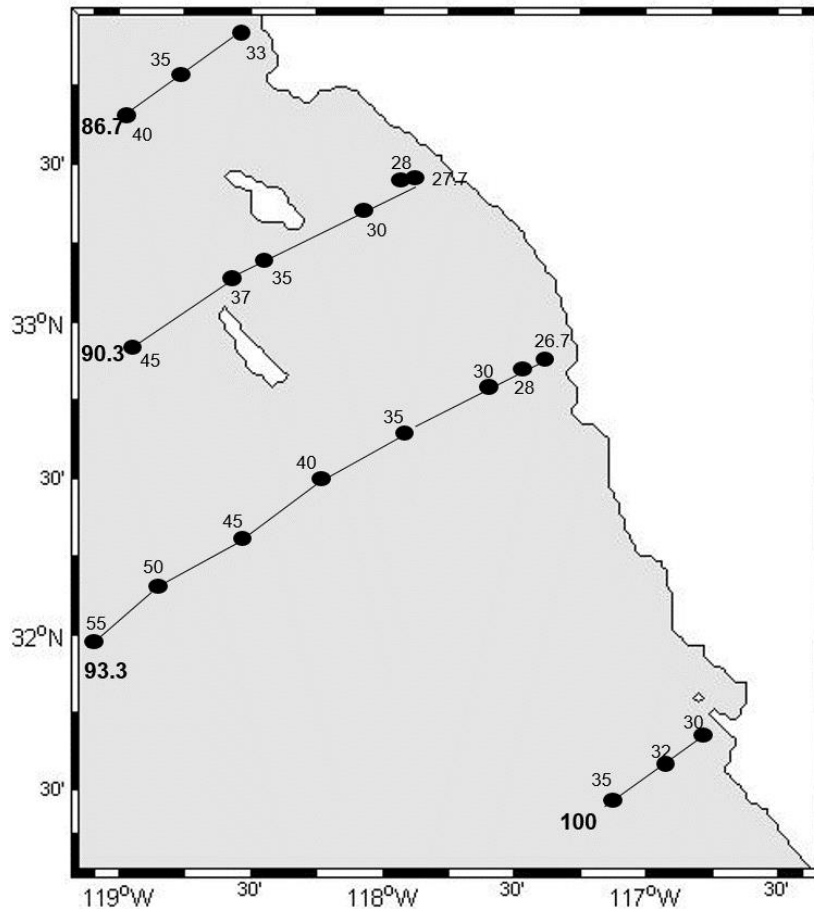


Figura 5 Dominio de la Malla 1 y las estaciones utilizadas de los transectos 86.7, 90.3 y 93.3 de la campaña CALCOFI y el transecto 100 de la campaña IMECOCAL.

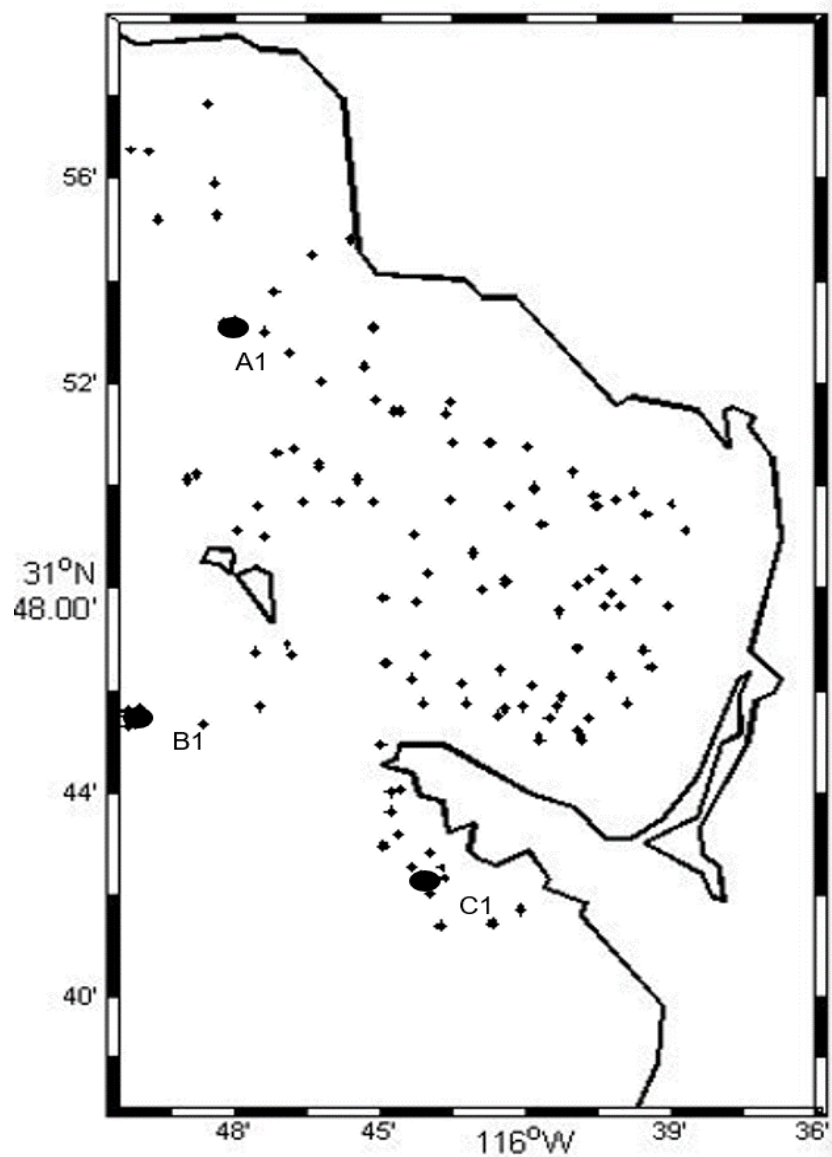


Figura 6. Dominio de la Malla 3 y distribución espacial de las estaciones hidrográficas realizadas durante las campañas FCM-SEMAR en la BTS. Los círculos de mayor tamaño representan los puntos seleccionados para la representación de los perfiles, mientras que los de menor tamaño representan todas las estaciones realizadas durante los 4 años de observaciones.

6. Resultados

En el primer apartado de los resultados se presenta el diagnóstico del modelo para comprobar que efectivamente la simulación llega a una estabilidad numérica. En las secciones siguientes se mostrarán las salidas del modelo comparadas con datos observados, para así poder definir si la influencia de la CC es representada de manera correcta dentro del modelo.

En la primera sección que se presenta después del diagnóstico del modelo se observa la representación del sistema de la Corriente de California donde se comparan mediante secciones transversales las salidas de la Malla 2 con respecto al transecto 100 estaciones 30 32 y 35 de IMECOCAL. Posteriormente vemos lo obtenido para la hidrografía de la BTS donde observamos 3 perfiles definidos como representativos, ya que se encuentran en puntos como la entrada norte, la parte central cercana al cañón y la zona sur de la BTS. En esta misma sección se realizaron diagramas T-S de todos los datos de la campaña de la BTS y del transecto utilizado de IMECOCAL para poder observar las propiedades hidrológicas de la columna de agua. En el último segmento de la sección de resultados se muestra la información obtenida sobre la circulación superficial de la BTS comparada con datos de radar HF y la circulación en la columna de agua en las dos entradas de la BTS. Además de 5 perfiles verticales para observar la velocidad a lo largo de la columna, 4 en la entrada norte y 1 en la parte central de la BTS.

6.1 Diagnóstico del modelo

El estudio de las variables diagnóstico permite verificar la conservación de masa del modelo así como la estabilidad alcanzada por él mismo. El diagnóstico de valores promedio permite saber a partir de qué año una simulación numérica se estabiliza. Se considera que el modelo es más estable cuando las fluctuaciones de las variables se aproximan más al valor medio (línea recta de cada

gráfica). En la Figura 7 podemos observar que la mayoría de las variables se estabilizan a partir del tercer año. Este diagnóstico también permite observar que el modelo respeta bien la estacionalidad (presencia de oscilaciones estacionales, dado que las simulaciones son climatológicas y no interanuales). Es importante señalar la dificultad de modelar la conservación de sal y con ello, el alcanzar su estabilidad, de ahí las fluctuaciones que se observan en el diagnóstico. Las salidas útiles del modelo son a partir del cuarto año, una vez que la energía cinética se estabiliza, observándose variaciones periódicas.

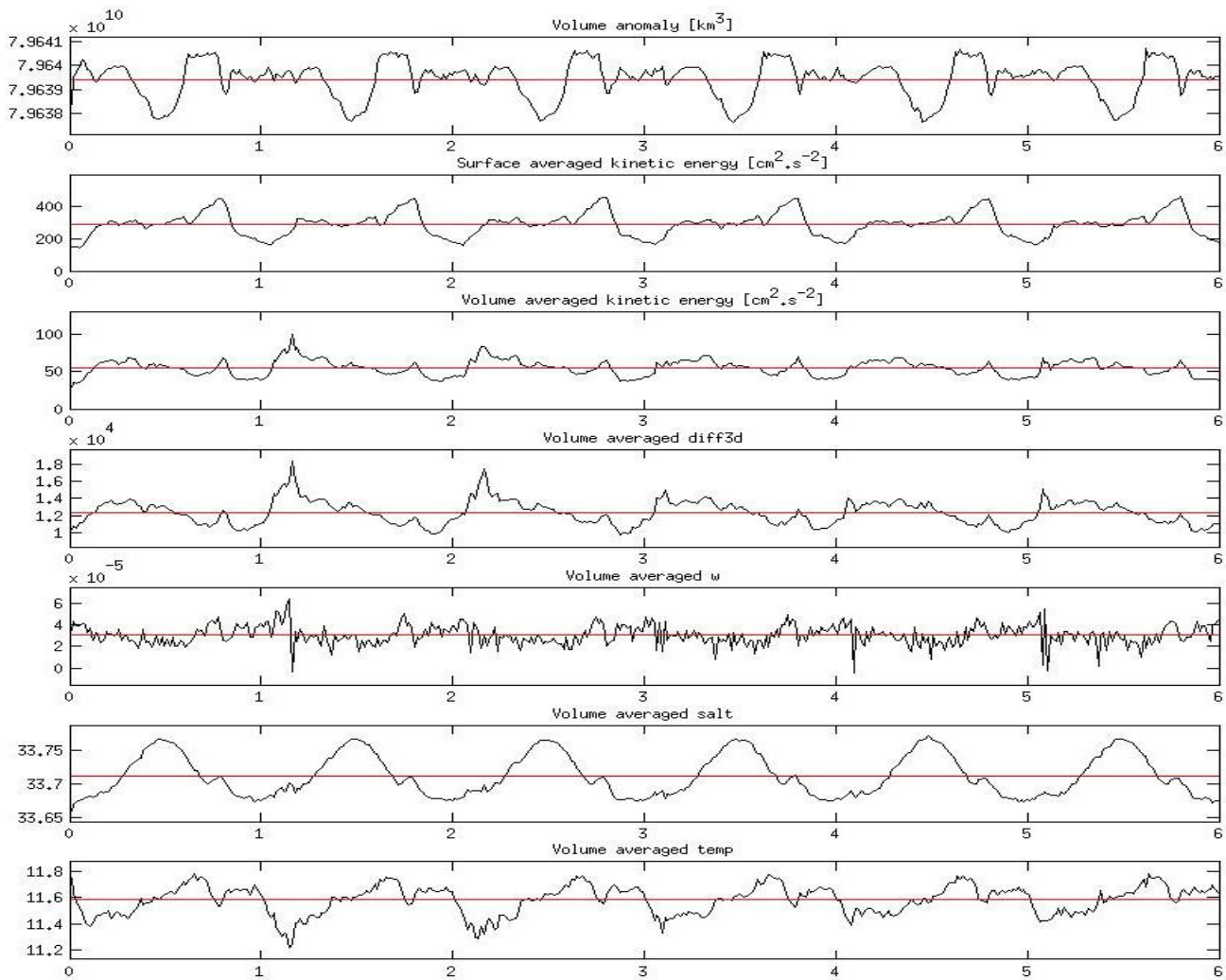


Figura 7. Diagnóstico de estabilidad del modelo.

6.2 Sistema de la Corriente de California

En esta sección se muestra la forma en que los resultados del modelo fueron validados con respecto a la Corriente de California. Se muestran las secciones a lo largo del transecto 100 estaciones 30, 32 y 35 de la campaña de IMECOCAL comparadas con las salidas del modelo de la segunda Malla (Figura 8 y 9). Se eligieron dos temporadas para representar la variación interanual del modelo con respecto a lo observado. Podemos apreciar como el modelo representa cualitativamente el patrón de los valores observados, con algunas diferencias en los valores a partir de los 300-400 metros de profundidad.

En primavera (Figura 8), la capa superficial se encuentra estratificada y con se observa un patrón de surgencia tanto en simulación numérica (figura del lado izquierdo) como en las observaciones (figura del lado derecho). Los valores de temperatura observados a lo largo de la columna de agua se replican visualmente en el modelo, con valores en superficie de alrededor de $\sim 18^{\circ}\text{C}$ en la zona de mar abierto, de $\sim 15^{\circ}\text{C}$ en la zona costera, y valores de $\sim 5^{\circ}\text{C}$ a 600 m. Cercano a la costa, la zona de la termoclina es aproximadamente un 60% mas profunda que hacia mar abierto. En cuanto a la salinidad superficial, ésta alcanza valores de alrededor de ~ 33.5 , con estratificación bien definida. En esta propiedad nos es más sencillo apreciar la cuña representativa de una surgencia que se forma en la superficie en el intervalo de 50-100 m. A diferencia de lo observado en la temperatura, aquí podemos observar como la columna de agua de datos observados cuenta con un menor rango de valores a lo largo de la superficie y alcanza un valor de 34.4 a partir de los ~ 350 m mientras que en el modelo se presenta una mayor variación de valores a lo largo de la columna alcanzando ese mismo máximo a una profundidad de ~ 600 m. Estas diferencias pudieran deberse al hecho de que las simulaciones numéricas son climatológicas, mientras que las observaciones pertenecen a un año post Niño (2011).

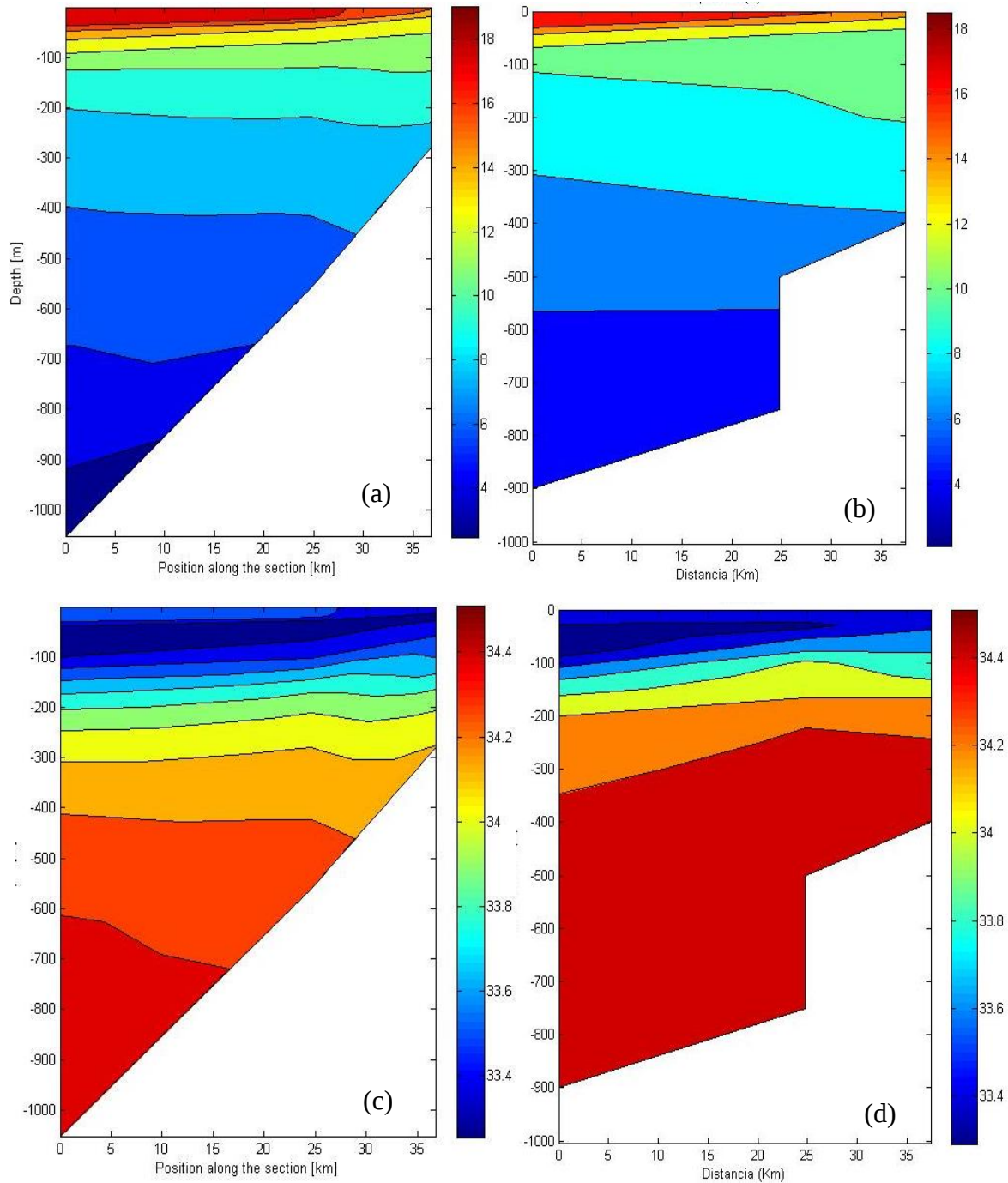


Figura 8. Comparación de secciones de las salidas del modelo (8a y 8c) de las variables de temperatura (parte superior) y salinidad (parte inferior) contra los datos observados correspondientes al Lance 100 estaciones de la 30 a la 35 de la campaña IMECOCAL (8b y 8d) para los meses de primavera (Marzo, Abril, Mayo)

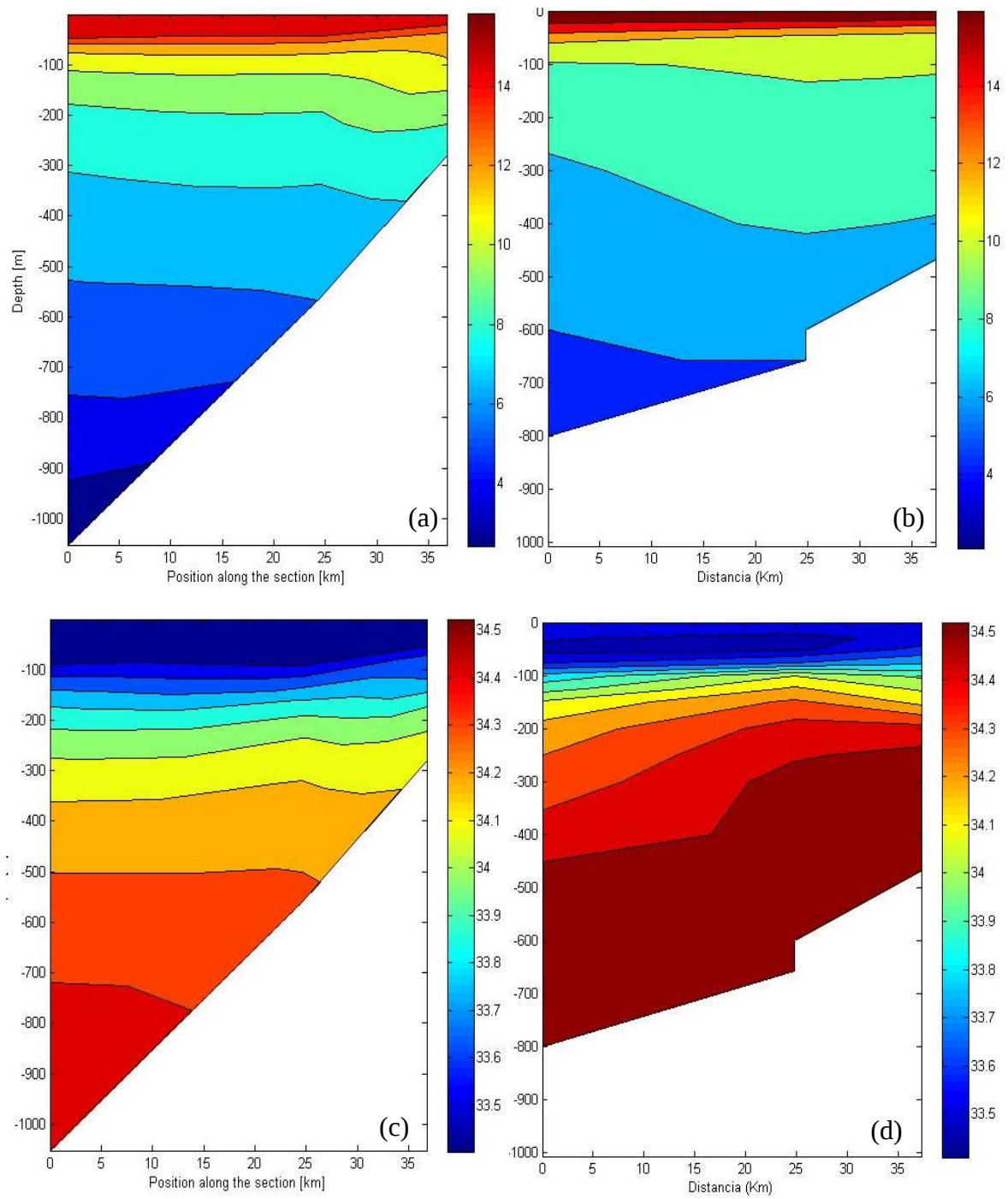


Figura 9. Comparación de secciones de las salidas del modelo (9a y 9c) de las variables de temperatura (parte superior) y salinidad (parte inferior) contra los datos observados correspondientes al Lance 100 estaciones de la 30 a la 35 de la campaña IMECOCAL (9b y 9d) para la los meses de otoño (Septiembre, Octubre y Noviembre).

Durante otoño (Figura 9), al igual que en primavera se observa una estratificación bien definida a lo largo de la columna, tanto para temperatura como salinidad. La temperatura superficial es de $\sim 14^{\circ}\text{C}$, observándose, además, una señal de surgencia más débil que en primavera. En profundidad, la distribución de la temperatura en el modelo coincide más cercanamente con el rango de valores observados que en primavera, teniendo un valor similar a lo largo de la columna hasta una profundidad de ~ 500 m. En cuanto a la salinidad, los valores a partir de los ~ 200 m difieren notablemente de las observaciones, debido en parte a que las simulaciones son climatológicas y las observaciones son temporales. Esto se demuestra al ver como el máximo ~ 34.5 en salinidad se alcanza a una profundidad de alrededor de 300 metros para las observaciones, mientras que en el modelo este valor se alcanza hasta los 700 metros de profundidad.

En la Figura 10, observamos que para la temporada de primavera, representada por los meses de Marzo, Abril, Mayo, tenemos un valor normalizado para la Raíz Cuadrática Media (RMS) de 0.2370 para salinidad y de 0.0585 para temperatura. Estos valores representan el error en los datos, lo cual reitera que la temperatura es mejor representada por la simulaciones numéricas, mientras que salinidad modelada presenta mayores variaciones respecto a las observaciones IMECOCAL 2011 debido a la presencia de aguas no propias del sistema de la CC.

En otoño, los valores de RMS (Figura 10) son de 0.1920 para la salinidad y de 0.0714 para la temperatura, afirmando nuevamente que la mayor diferencia entre los datos observados y los modelados se encuentra en la salinidad, debido al tipo de simulación realizada (climatológica).

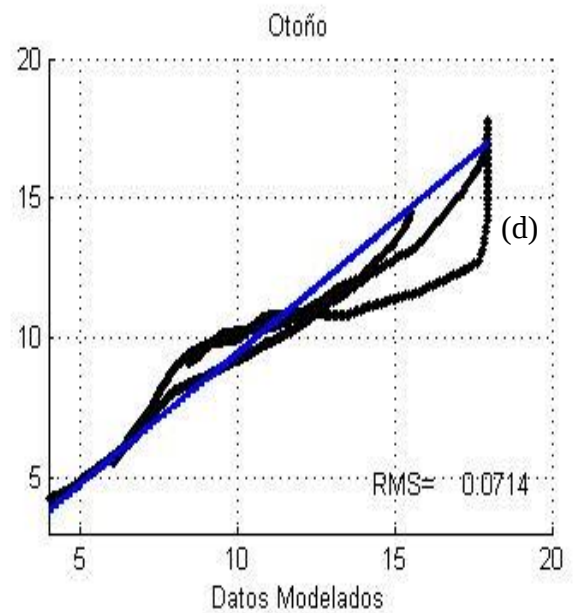
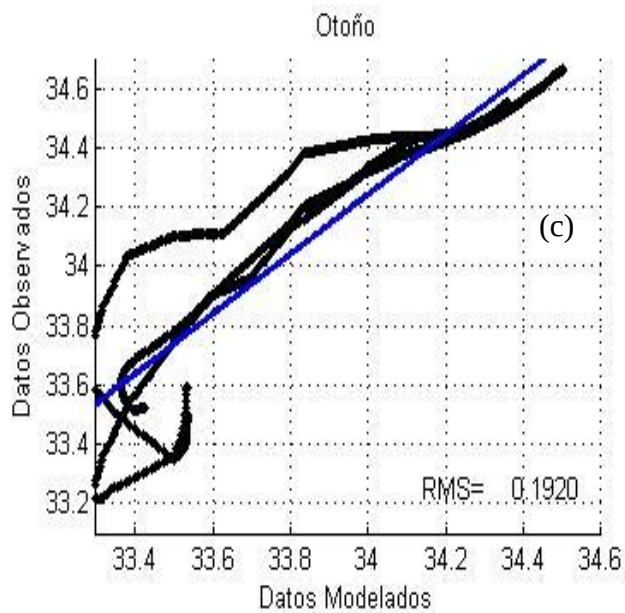
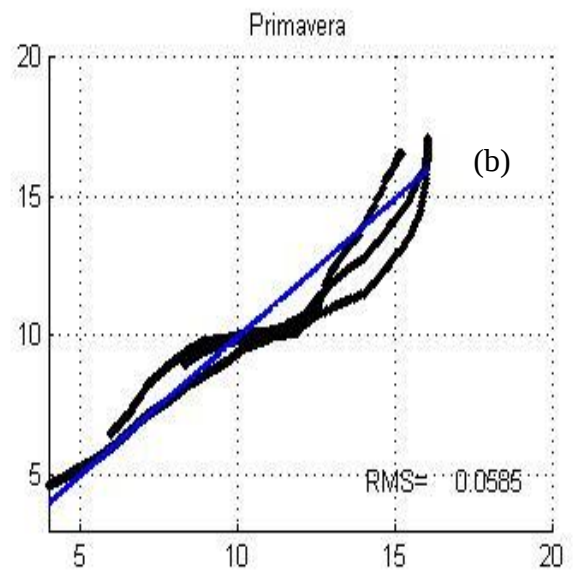
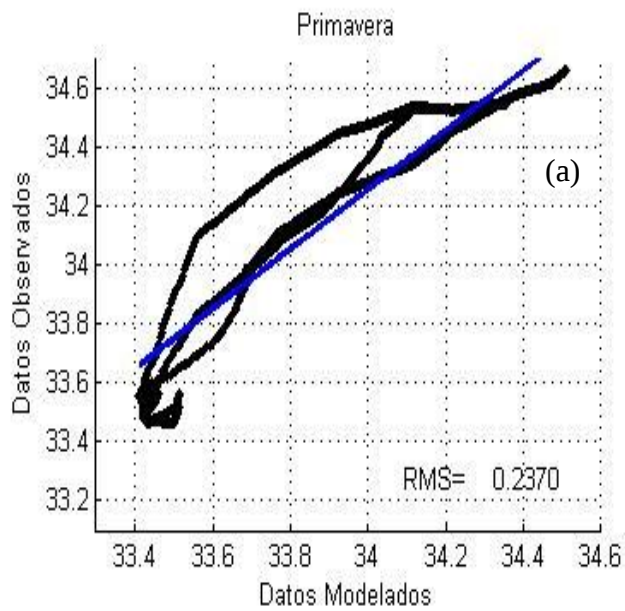


Figura 10. Regresión lineal de los datos utilizados en las secciones de primavera (10a y 10b) y de otoño (10c y 10d), del lado derecho tenemos la variable de salinidad y del lado izquierdo la variable de temperatura. En la gráfica se muestra el valor de la raíz cuadrática media para el conjunto de datos que representa.

La Corriente de California se considera una corriente superficial debido a que su profundidad es de 300 m. Es importante señalar que la discrepancia en salinidad para ambas temporadas, entre observaciones y modelación, se observa a partir de los 300 metros. Dado que los datos observados alcanzan valores máximos hasta de 34.6 (aunque en la figura se muestre una escala hasta los 34.5 para homologar escalas con respecto a las simulaciones numéricas), esta diferencia de valores podría ser explicada en términos de los resultados de Durazo *et al* (2002), quienes realizaron un trabajo donde reportaban datos de un evento de El Niño (1997-1998) y datos del evento post-Niño (1998-1999); en este trabajo se puede observar como durante un año Niño observamos una intrusión de la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs) muy marcada; sin embargo, todavía durante el periodo post-Niño se observaba esta intrusión aunque en menor escala.

La Figura 11 muestra aguas de la campaña de IMECOCAL con características correspondientes a esta masa de agua. En la página de CALCOFI (<http://calcofi.org>) se reporta que el 2009-2010 fue año Niño, dado que los datos utilizados son del 2011 se infiere que esta anomalía en la salinidad podría ser una consecuencia post-evento de El Niño antes mencionado. La razón por la que esto no se vea reflejado en el modelo es debido justamente a que tanto las condiciones iniciales como de forzamientos utilizados para esta salida no contemplan la variación de un evento de esta escala, por lo que se justifica que el modelo no lo represente.

No obstante, Linacre y colaboradores (2010) reportan datos de 11 años promediados para los primeros 300 metros de la columna de agua, dentro de los cuales de encuentran las estaciones de IMECOCAL utilizadas (100.30, 100.32 y 100.35). En estas observaciones se reporta una salinidad de 34.2 a una profundidad de 300 metros un dato más cercano a lo simulado en esta corrida.

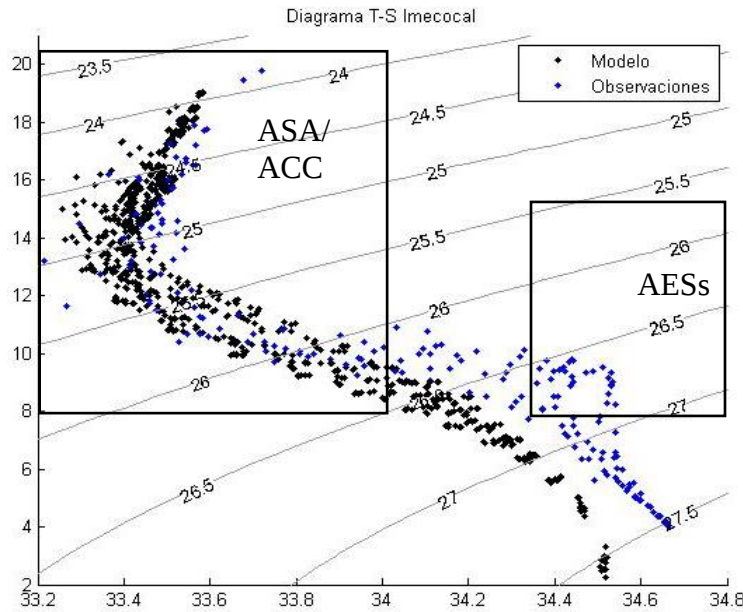


Figura 11. Diagrama T-S de los valores observados de la campaña de IMECOCAL y las salidas del modelo. Se definieron las fronteras de la masa de agua ASA o ACC: Agua Sub-ártica o Agua de la Corriente de California; AESs: Agua Ecuatorial Subsuperficial

6.2 Hidrografía de la Bahía Todos Santos

Una vez validada la presencia de la Corriente de California en el exterior de la BTS, procedimos a validar la hidrografía dentro de la bahía. Para esto, de las aproximadamente 21 estaciones realizadas de manera consecutiva durante 6 campañas oceanográficas académicas por la FCM-SEMAR (con un total de aproximadamente 130 lances), se escogieron solamente 3 estaciones (denominadas A1, B1 y C1 ver Anexos) para representar los siguientes puntos a lo largo de la bahía: la entrada norte (PSM), la zona central cercana al cañón y la entrada sur (PB). Se realizaron los perfiles de temperatura y salinidad promedio de 3 años de datos de estas estaciones para compararse con las salidas del modelo. En general se observó que el modelo representaba cualitativamente el mismo patrón en los perfiles que los datos observados, ubicando a la misma profundidad tanto la termoclina como la haloclina (Figura 12).

Al corroborar estadísticamente la similitud de los perfiles, se observó que 3 de ellos representaban una variación mayor entre lo observado y lo modelado (Figura 12). Los perfiles que mostraban estas variaciones fueron: en la estación A1, la salinidad; y en la estación B1, tanto la salinidad como la temperatura.

Para el perfil A1, se obtuvo un RMS de 0.3092. Se observó un valor mínimo de alrededor de 33.3 a una profundidad aproximada de 30 m, que es coincidente para los dos conjuntos de datos, la mayor diferencia se observa a una profundidad de 120 m donde el modelo alcanza un valor máximo 33.6 mientras que las observaciones llegan a un valor cercano a 34.1 (Figura 12 C y D).

En la estación B1 se encontró una alta variabilidad con un valor de RMS de 0.4974 para la salinidad y de 0.4093 para la temperatura. En las observaciones la temperatura superficial tiene un valor aproximado de 14°C para ambos conjuntos de datos y a una profundidad de 90 m las observaciones tienen un valor de 10°C mientras que la salida del modelo presenta un valor de 11.5°C. A lo largo de la columna de agua se observa una diferencia también en el comportamiento de la termoclina, mostrando una termoclina mejor definida en las observaciones que en el modelo (Figura 12 E y F).

Para esa misma localidad B1, la salinidad presenta un valor mínimo de 33.4 para ambos perfiles, pero a diferentes profundidades. En las observaciones el mínimo se presenta a una profundidad de 30 m mientras que el modelo lo presenta a una profundidad de 60 m. Al llegar a una profundidad de 90 m el modelo alcanza un valor máximo de salinidad de 33.5 lo cual indica una baja variabilidad a lo largo de la columna de agua, mientras que los datos observados alcanzan un valor de 34.0 mostrando un mayor rango de valores a lo largo de la columna de agua (Figura 12 G y H).

Esta diferencia de valores podría deberse a la variabilidad de los datos entre años. Otra razón podría ser que estamos hablando de profundidades relativamente someras y los modelos tienden a tener una

debilidad cercano a la superficie, esto no explica la diferencia de valores en el fondo pero puede ser un factor influyente en el cálculo de RMS debido a que una mala representación en los primeros 20m de profundidad en una columna de agua de apenas 70m, representaría cerca de un 30% sub o sobre estimado, es decir, nos quedaríamos con pocos datos disponibles confiables por lo somero de la bahía.

Las localidades donde los perfiles tienen un RMS menor son los correspondientes a A1 y C1. En A1, la termoclina se encuentra alrededor de los 20 m de profundidad con una RMS de 0.1679. En superficie observamos valores de 16°C para los valores observados y 17°C para los obtenidos mediante el modelo, con mínimos de 10.5°C y 11°C para los valores observados y modelados, respectivamente (Figura 11 A y B).

Finalmente tenemos la estación C1, cercana a PB, donde los patrones observados y modelados son mucho más similares. El cálculo de la RMS para esta localidad fue de 0.0750 para la temperatura y de 0.1171 para la salinidad (Figura 13). En la superficie tenemos un valor de 16°C para ambos perfiles, alcanzando un valor de 11°C a los 120 m de profundidad (Figura 12 I y J). Mientras que para la salinidad el mínimo es de 33.3, y el máximo de 33.7 a 120 m de profundidad, mostrando un comportamiento similar entre ambos perfiles (Figura 12 K y L).

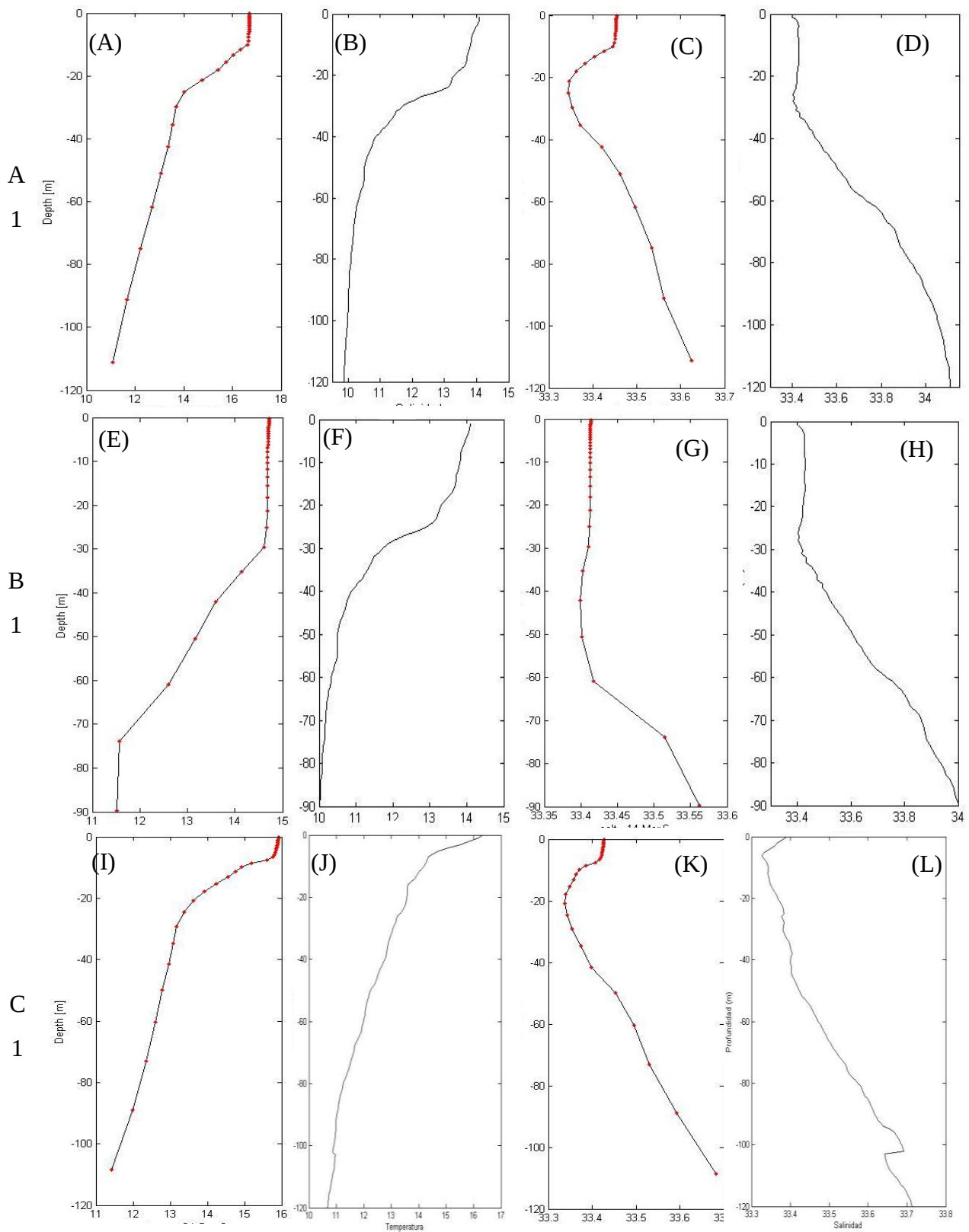


Figura 12. Comparación de perfiles de salinidad y temperatura promedio de datos observados (2010-2013) en la BTS contra el promedio de cada 5 días de la salida del modelo. A, B, C y D corresponden a una estación ubicada en la zona norte de la BTS Cercano a PSM. E, F, G y H corresponden a una estación ubicada la zona intermedia cercana al cañón de la BTS. I, J, K y L corresponde a una estación ubicada en la zona sur de la BTS cercana a PB, denominada C1.

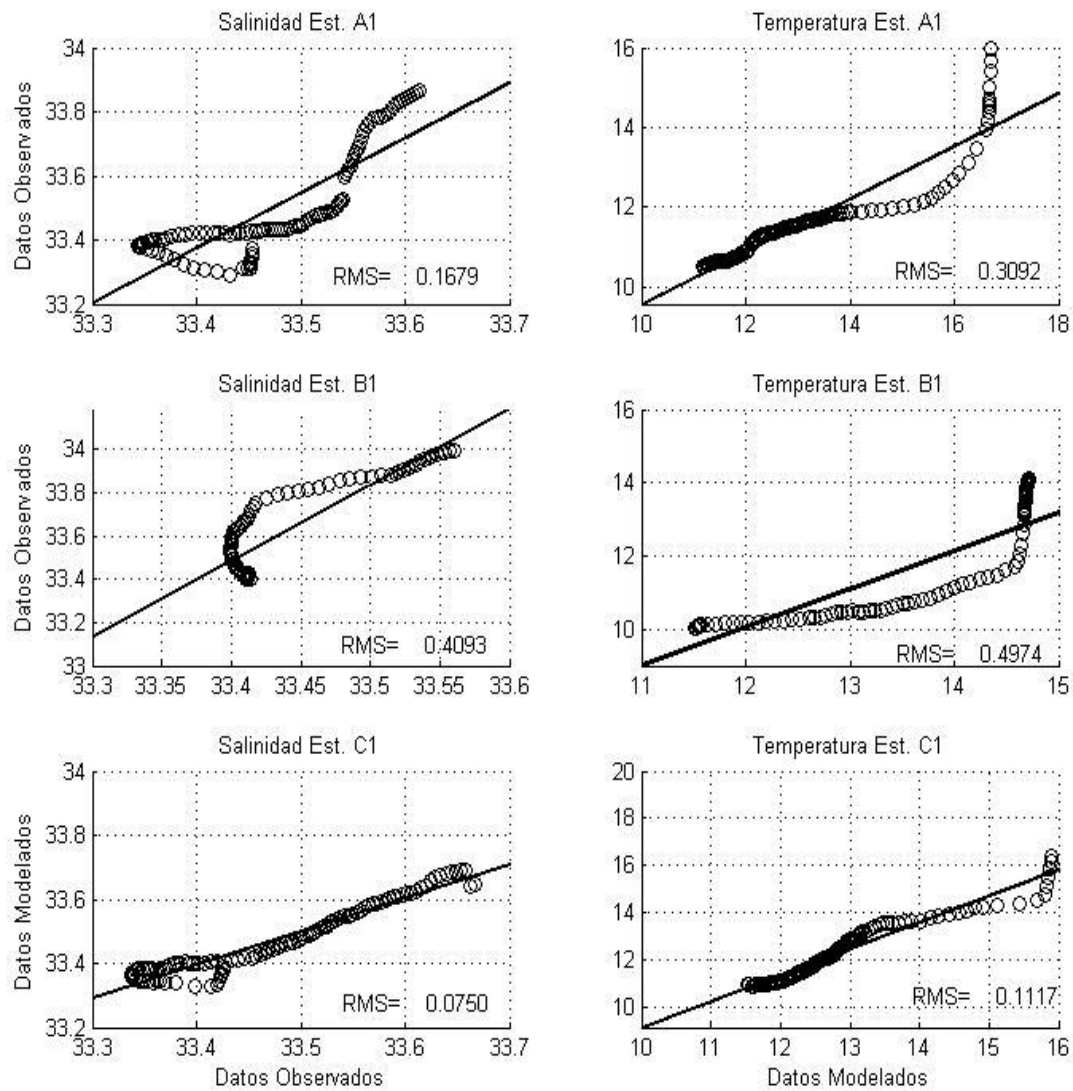


Figura 13. Regresión lineal de los datos utilizados en las secciones, del lado derecho tenemos la variable de salinidad y del lado izquierdo la variable de temperatura. En la gráfica se muestra el valor de la raíz cuadrática media para el conjunto de datos que representa.

Debido a que tres perfiles no facilitan la visualización del comportamiento o similitud de la Malla 3 con respecto a lo medido, se realizó un Diagrama T-S de los 3 años de datos observados sin promediar, contra las salidas del modelo (Figura 14).

Al igual que en las figuras anteriores, se puede observar una clara estacionalidad en el diagrama, obteniendo temperaturas más altas en el mes de Septiembre, con valores hasta de 22°C en los datos de observación y 18°C en los obtenidos por el modelo, lo cual coincide con lo reportado sobre la hidrografía de la BTS (Larrañaga, 2013), mientras que en Marzo las temperaturas máximas para la simulación numérica y las observaciones fueron de 16°C. En cuanto a la salinidad los datos del modelo comparten la misma tendencia que los valores observados, teniendo valores ligeramente menores de salinidad en Marzo comparado con Septiembre.

En el diagrama T-S podemos observar claramente la presencia del Agua Sub Ártica (ASA) o Agua de la Corriente de California (ACC), lo cual nos indica nuevamente la fuerte influencia de la CC dentro de la caracterización hidrográfica dentro de la Bahía de Todos Santos, tanto en observaciones como en las salidas de simulaciones del modelo.

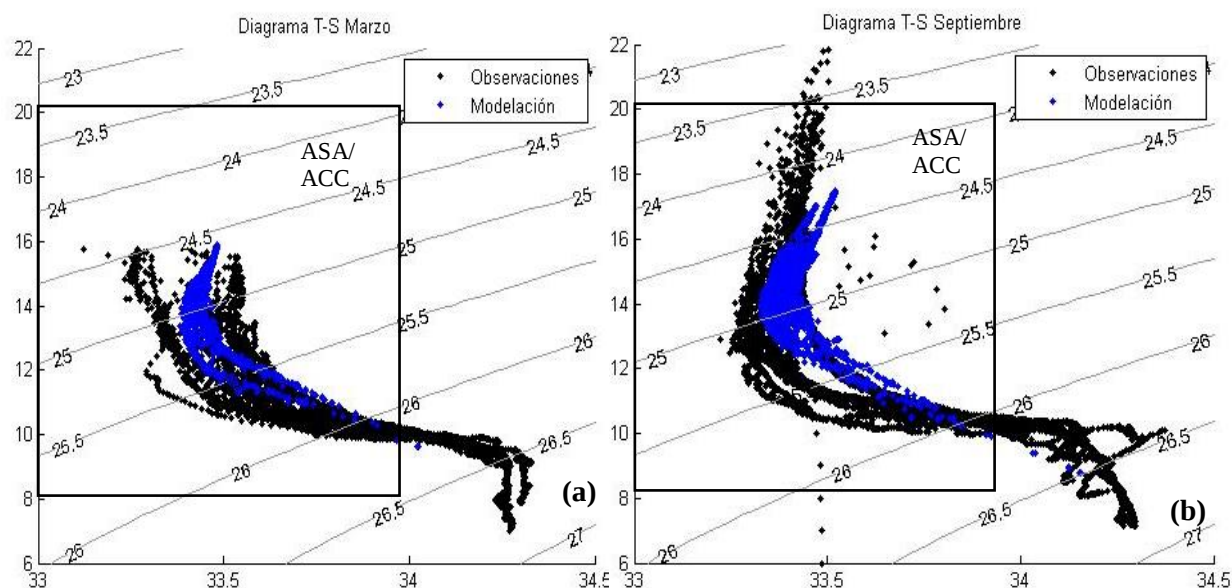


Figura 14. Diagrama T-S de los valores observados de la campaña de BTS (Negro) y las salidas del modelo, el promedio mensual y el promedio estacional del año 5 y 6 (Azul). 14a valores para el mes de Marzo, 14b valores para el mes de Septiembre. Se definieron las fronteras de la masa de agua ASA o ACC: Agua Sub-ártica o Agua de la Corriente de California.

6. 3 Circulación de superficie

Una vez validados los datos hidrográficos obtenidos por el modelo se continuó a observar la circulación dentro de la BTS. Como resultados se reportó la circulación superficial anual y estacional (invierno, primavera, verano y otoño) en el dominio de la malla 3. También se obtuvieron perfiles verticales de la velocidad en 4 puntos de entrada entre PSM e ITS y 1 punto dentro de la bahía.

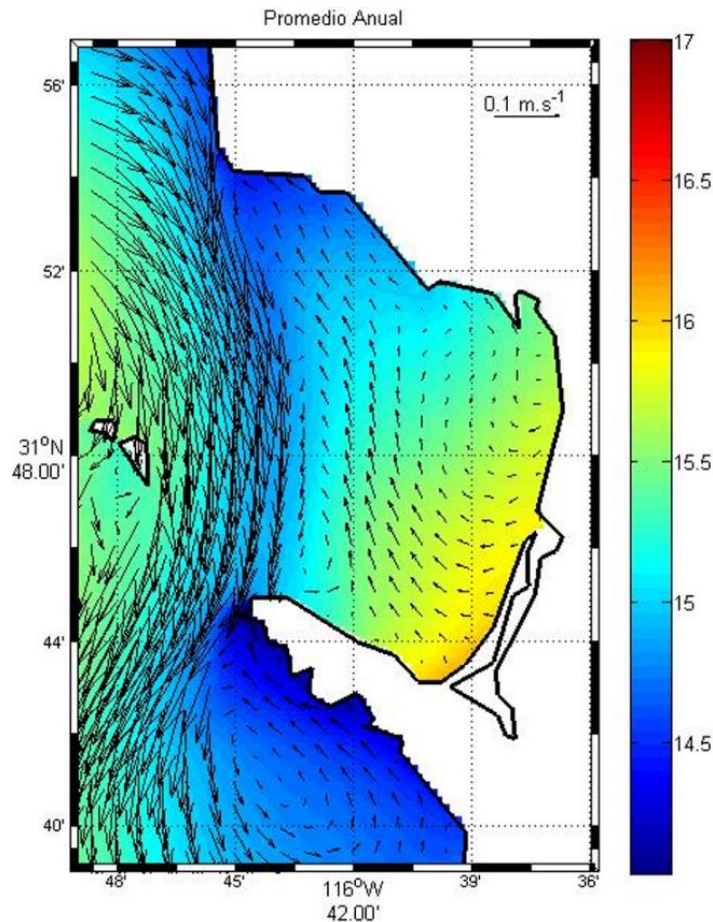


Figura 15. Promedio anual de la circulación dentro de la BTS; en color, la temperatura superficial.

En la Figura 15 observamos el promedio anual de la circulación y la temperatura superficial. En cuanto a la temperatura tenemos que el máximo es de 16°C y se encuentra ubicada en la costa donde se ubica la barra del estero de Punta Banda, y el valor mínimo se encuentra en la parte exterior de la punta de PB con un valor de 14°C, zona conocida como una zona de surgencia costera. En cuanto a la circulación superficial tenemos que del lado exterior de la bahía se presenta una corriente intensa que alcanza los 0.25 m s⁻¹, identificada como meandros del sistema de la CC (Mateos *et al.*, 2009). Mientras que para el interior de la bahía hay una circulación dominante que va del sureste de la BTS hacia el noroeste de esta misma, los valores van de 0.05 a 0.10 m s⁻¹ siendo más intensas sur de la bahía que en el norte de la misma. En las zonas donde se ven las velocidades de menor intensidad parece que se está realizando una

formación de giros, uno cercano a la punta de PB de lado interior de la BTS y el otro en la parte noreste de la bahía cercana la zona que corresponde al puerto. La circulación promedio se presenta diferente a lo descrito por Mateos *et al.* (2009) donde describen un flujo de entrada de PSM con dirección al sur de la BTS hacia PB formándose un giro anticiclónico bien definido en la zona norte la bahía. Esto puede deberse a diferentes factores como lo es la diferencia en el anidamiento y de las características de la simulación, como lo son la resolución obtenida, el tamaño de la malla, la batimetría utilizada por mencionar algunos.

Comparando con lo reportado por Larrañaga (2013), cuyo estudio fue realizado con radares de alta frecuencia, tenemos que la temperatura máxima superficial para el año del 2010 es de 16.8°C y se encuentra en la zona central interior de la bahía al igual que lo obtenido en este trabajo. En cuanto a la circulación, también se muestra un flujo intenso dominante proveniente del exterior de la bahía ($\sim 0.15 \text{ m s}^{-1}$), pero a diferencia de lo reportado en este trabajo el flujo dominante dentro de la bahía va en dirección al interior de la bahía. Aun mostrando diferencias en la dirección las magnitudes de menor intensidad se encuentran alrededor de los 0.05 m s^{-1} como se reporta en este trabajo. Las diferencias en la dirección de la corriente superficial puede deberse a que para el trabajo de radares de alta frecuencia se utilizaron datos horarios de viento mientras que para la modelación se utilizaron datos de viento sinóptico, además de que los radares son capaces de medir la corriente superficial a un metro de profundidad mientras que la profundidad elegida para la obtención de estas imágenes en el modelo es de 10 metros. Esta diferencia nos permite evaluar la verdadera importancia de los vientos locales sobre la circulación superficial dentro de la bahía. En los resultados de simulación es observable también lo sugerido por Durazo y colaboradores (2012), la presencia de una zona de calma frente a la playa municipal.

En la Figura 16 podemos observar la variabilidad estacional de las corrientes y temperatura superficiales dentro de la BTS. Para invierno tenemos que la temperatura dentro de la bahía se encuentra alrededor de los 14°C con valores cercanos a los 15°C muy pegado a la costa central. Para las corrientes superficiales nos encontramos que en Invierno son de baja intensidad dentro de toda la bahía y que tienen un valor aproximado de 0.05 m s^{-1} . Alcanzamos a distinguir como hay un flujo de entrada en la zona norte entre PSM y la ITS y en la parte central de la bahía vemos dos giros bien definidos que generan una recirculación en la parte central de la bahía y así el agua dentro de la bahía encuentra su camino hacia fuera de la BTS. Del lado noreste de la bahía observamos un giro anticiclónico, mientras tanto en la región sur, muy cercana a PB, observamos un giro ciclónico. Del lado exterior de la bahía observamos una corriente intensa con flujo hacia el sur que alcanza velocidades de hasta 0.25 m s^{-1} . Comparando con lo reportado por Larrañaga (2013) la dirección de la corriente superficial modelada tampoco corresponde con sus resultados, no obstante, la temperatura si corresponde con un valor reportado de 15°C (Figura 16a).

Para la temporada de primavera tenemos mayor variabilidad para la temperatura promedio, ésta se encuentra con valores máximos de 16°C en la zona costera central de la BTS y disminuye en dirección a mar abierto, tal y como lo reporta Larrañaga (2013). Para esta temporada el patrón de circulación cambia, observamos un cambio de dirección de flujo en donde previamente veíamos un flujo de entrada, justo en la boca norte de la BTS. Debido a este cambio de flujo se pierde la visión de los dos giros que se observaban bien definidos en la temporada de invierno (Figura 16b).

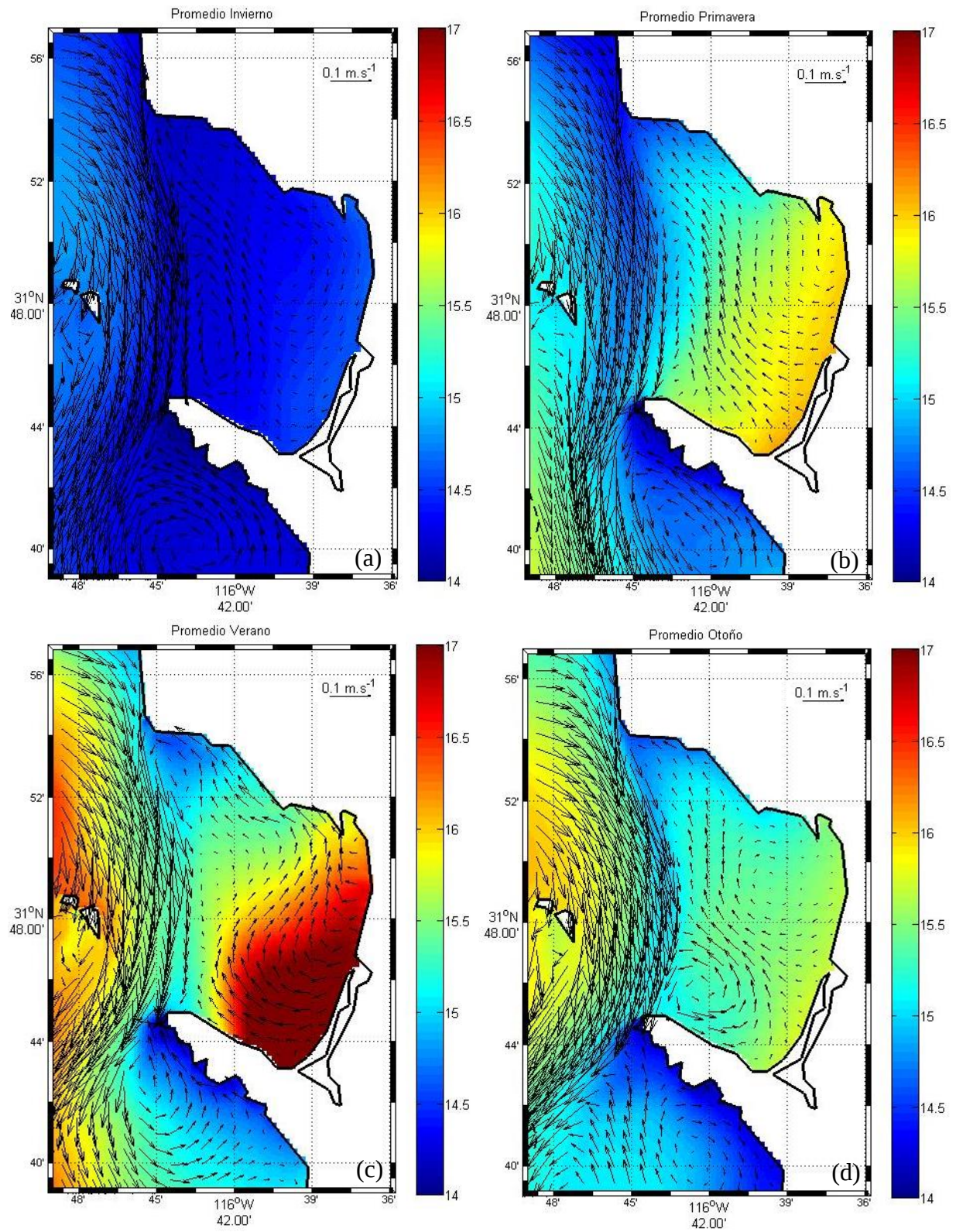


Figura 16. Promedios estacionales de la temperatura superficial y de las corrientes superficiales de la BTS. Invierno(a), Primavera(b), Verano(c) y Otoño(d).

Para verano obtenemos que el valor de temperatura superficial es mayor a los 17°C y se extiende casi por toda la bahía, en esta temporada se presenta el valor más alto de temperatura en el año, pero sigue siendo diferente a valores reportados que llegan hasta los 20-24°C. Para la circulación observamos que el patrón de cambio de flujo de entrada en la zona norte de la BTS se intensifica llegando a alcanzar velocidades de 0.1 m s⁻¹. La circulación dentro de la bahía se marca de manera bien definida como avanza por todo el lado interior de la costa de sur a norte, dejando un giro ciclónico a su paso, hasta introducirse en la corriente externa que se mantiene constante a lo largo de las cuatro estaciones con una velocidad de alrededor de 0.25 m s⁻¹ (Figura 16c)

Finalmente para otoño tenemos que la temperatura superficial volvió a disminuir a valores de ~15.5°C en la parte central de la costa y volvemos a un patrón de circulación similar al que tenemos durante invierno. Seguimos viendo, aunque ya debilitada, la dominancia de la dirección de las corrientes superficiales hacia el noroeste con la presencia nuevamente de 2 giros, el anticiclónico cercano al puerto de la BTS y el ciclónico en la parte sur de la bahía cercano a punta banda. Aquí podemos observar la única característica que es coincidente con el trabajo de Larrañaga (2013) y es que a pesar de los cambios de dirección que se presentan a lo largo del año ambos trabajos coinciden en un flujo de baja intensidad con orientación al suroeste en una pequeña sección cercana a la entrada de la boca del estero (Figura 16d).

6.4. Distribución de velocidad en la vertical

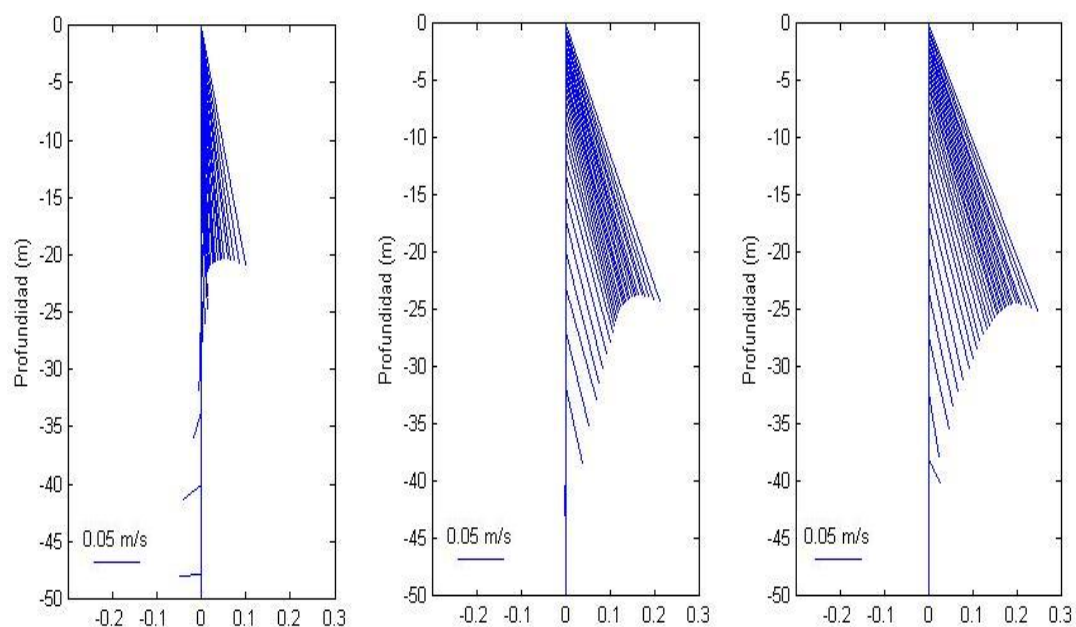
Se realizaron 5 perfiles verticales de velocidad, 4 en la entrada norte para observar el flujo a lo largo de la columna de los 0 a los 50 m de profundidad y uno en la zona central de la BTS: la Isla, Centro (entre la Isla y San Miguel), San Miguel (SM), San Miguel Costa (SMC), y Rincón de Ballenas (RB) (Figura 17).

Para el punto denominado la Isla se obtuvieron velocidades de 0.2 m s^{-1} en la parte superficial en los primeros 20 m y descendiendo hasta debajo de los 0.05 m s^{-1} debajo de los 20 m, estos datos son similares a los reportados por Miranda (2012), quien encuentra velocidades mayores a los 0.2 m s^{-1} sobre los 25 m de profundidad descendiendo hasta los 0.1 m s^{-1} a los 50 m de profundidad.

Para las dos estaciones centrales de la entrada norte tenemos los puntos de San Miguel (SM) y Centro, en la simulaciones estos puntos cuentan con velocidades similares a lo largo de la columna alcanzando velocidades máximas de 0.27 m s^{-1} en superficie, disminuyendo con respecto a la profundidad alcanzando velocidades menores a 0.05 m s^{-1} a los 30 m de profundidad. Miranda (2012) Presenta datos similares en la estación de Centro, sin embargo para el punto de San Miguel presentan velocidades debajo de los 0.2 m s^{-1} .

En el modelo, para el punto de San Miguel Costa (SMC) se presentaron valores de cero en la componente “y” y velocidades de hasta 0.1 m s^{-1} a los 10 m de profundidad, mientras que Miranda (2012) reportó valores similares con una ligera componente en “y” y una velocidad máxima a los 7 m de profundidad.

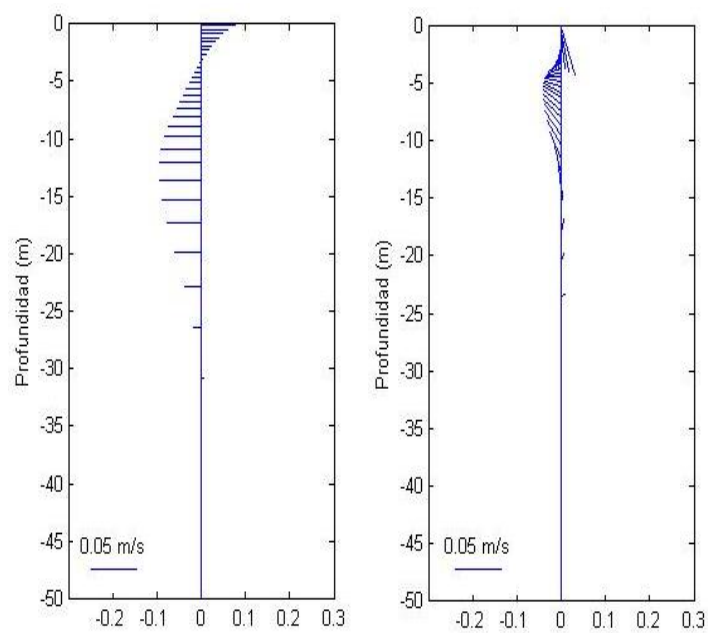
La entrada norte que corresponde a la sección compuesta por los primeros 4 puntos antes mencionados (Figura 17), mantiene una dirección constante al sureste, estos resultados coinciden con resultados previos de Miranda (2012), y con lo mencionado por Álvarez-Sánchez *et al.*, (1988), y Larrañaga (2013). Para Rincón de Ballenas (RB) se obtuvieron las velocidades mínimas con dirección noroeste y valores menores a 0.05 m s^{-1} a lo largo de toda la columna de agua desde superficie hasta los 25 m de profundidad.



Isla

Centro

SM



SMC

RB

Figura 17. Resultados de velocidades promedio (ROMS) en la entrada norte y una en la parte central de la BTS. Isla; Centro; SM=San Miguel; SMC=San Miguel Costa; RB=Rincon de Ballenas (Ver Anexos para ubicación)

7. Discusión

Los resultados que se obtienen de una salida de modelo son dependientes a las características de la simulación misma, dependiendo de la resolución y características de los datos es la información que se va a obtener. El haber utilizado una corrida estable del sistema de la Corriente de California para las condiciones de frontera influyo a que la validación de los datos fuera exitosa tanto dentro como fuera del dominio de la BTS.

Se infirió que para las secciones comparadas con IMECOCAL (Figura 8 y 9) las diferencias, observadas principalmente en la salinidad a partir de los 300 m de profundidad, fueron por causa de que los datos de la campaña utilizada para la comparación fue realizada en la época post-evento de El Niño y en el diagrama T-S (Figura 11) se observaron aguas con características de la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial, lo cual de acuerdo con lo reportado por Durazo y colaboradores (2002) coincide con las características de un evento post-El Niño, por lo tanto, se justifica que el modelo no lo represente.

No obstante, se obtuvieron valores normalizados de RMS 0.2370 y 0.0585 en la temporada de Primavera para la variable de salinidad y temperatura respectivamente y de 0.1920 y 0.0714 para las variables de salinidad y temperatura respectivamente para la temporada de otoño (Figura 10). Por lo cual es adecuado creer que la comparación realizada con el transecto 100 de IMECOCAL resalta correctamente las características principales presentadas en los datos de IMECOCAL en la zona costera y superficial que corresponden a la estratificación vertical bien definida y la zona de surgencia costera.

Para la zona ya correspondiente de la BTS los perfiles presentados (Figura 12) cuentan con valores similares entre los obtenidos por el modelo y los observados en la campaña realizada por

la Facultad de Ciencias Marinas. Al corroborar estadísticamente los perfiles se encontró la mayor variación entre lo observado y lo modelado en la localidad A1 (salinidad) y la localidad B1 (salinidad y temperatura) con valores normalizados de RMS de 0.3092, 0.4974 y 0.4093 respectivamente. Mientras que la estación A1 para la variable de temperatura, y la C1 para la variable de temperatura y salinidad se obtuvieron valores normalizados de RMS de 0.1679, 0.0750 y 0.1117 respectivamente (Figura 13).

Se presentaron los diagramas T-S donde (Figura 14) se observó que el agua a lo largo de la columna contaba con las mismas características entre los datos modelados y los datos observados y eran pertenecientes a la masa de ASA/ACC para la zona de la BTS.

En cuanto a la circulación superficial promedio se observó una corriente intensa de $\sim 0.25 \text{ m s}^{-1}$ en el lado exterior de la bahía persistente a lo largo de todo el año, entrando por el lado norte entre PSM e ITS y saliendo por la sección sur entre PB e ITS, está siendo definida como un meandro de la Corriente de California. En cuanto a la parte interior de la bahía en el promedio anual se observa lo sugerido por Durazo y colaboradores (2012) que consiste en la presencia de una zona de calma (bajas velocidades) frente a la playa municipal, este patrón se presenta en todas las estaciones con excepción de Verano (Figura 15).

Dentro de la BTS se observaron dos patrones dominantes. En uno, correspondiente a las estaciones de Invierno-Otoño, se observa un flujo de entrada proveniente de PSM, además de dos giros en el interior de la bahía, uno ciclónico en la zona sur de la bahía cercano a PB y otro anticiclónico en la zona noreste de la BTS cercano al puerto de Ensenada y las velocidades que predominan son de baja intensidad, se encuentran alrededor de los 0.05 ms^{-1} (Figura 16 a y d)

El segundo patrón observado corresponde a las estaciones de Primavera-Verano, en este se observa un flujo que cambia de dirección y el flujo de PSM se convierte en un flujo de salida, transportando agua de la costa central de la bahía hacia fuera. En este patrón las corrientes se intensifican llegando a alcanzar una velocidad de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 16 b y c). Comparando con datos reportados (Larrañaga, 2013) se definió que efectivamente los vientos locales son los de mayor influencia en cuanto a la circulación superficial ya que al comparar con su trabajo de radares de alta frecuencia, donde utiliza vientos horarios, se observó que la dirección de la corriente es contraria a la definida en este trabajo donde se utilizan datos de vientos sinópticos. En la temporada de otoño (Figura 16d) se observó la única característica que es coincidente con el trabajo de Larrañaga, en cuanto a circulación superficial, y es que a pesar de los cambios de dirección que se presentan a lo largo del año se coincide en un flujo de baja intensidad con orientación al suroeste en una pequeña sección cercana a la entrada de la boca del estero.

Finalmente, para observar cómo se comportaban las velocidades en la vertical se realizaron 4 perfiles a lo largo de la entrada norte hasta los 50 m de profundidad y uno dentro de la bahía. Los perfiles de la entrada norte llegaron a valores máximos de 0.27 m s^{-1} en la parte central de la entrada, y valores debajo de los 0.05 m s^{-1} por debajo de los 30 m de profundidad con excepción de la cuarta gráfica, la estación costera que presenta velocidades máximas de 0.1 m s^{-1} y con una componente en “y” con valores de cero. Lo coincidente con los primeros 3 perfiles de la zona de entrada es que mantienen una dirección constante al sureste correspondiente con información previamente reportada (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988; Miranda, 2012; Larrañaga, 2013). Para el punto localizado dentro de la BTS (RB) se obtuvieron velocidades mínimas con valores menores a 0.05 m s^{-1} y dirección noroeste (Figura 17).

8. Conclusión

Los resultados que se obtienen de una salida de modelo son dependientes a las características de la simulación misma y a los forzamientos utilizados.

En cuanto a características hidrográficas el principal factor influyente en la BTS es la CC en condiciones “normales”, pero bajo condiciones Niño y/o post Niño aguas de origen tropical y subtropical se avecinan a la bahía, y éstas no se reprodujeron en la modelación debido a que todas las simulaciones fueron climatológicas.

La circulación superficial promedio para la BTS parece ser incorrecta debido a que el factor de influencia principal son los vientos locales, debido a las dimensiones espaciales de la bahía y el fuerte régimen de brisas que se presenta en la zona. Por lo cual para obtener una circulación superficial adecuada es necesario utilizar vientos locales en lugar de vientos sinópticos, y más aún, hacer corridas con asimilación de datos.

Para las características del modelo en la circulación superficial se presentaron dos patrones de circulación. Uno para Otoño-Invierno, con un flujo de entrada proveniente de PSM y con dos giros en el interior de la bahía. El segundo para Primavera-Verano donde el flujo cambia de dirección y el flujo de PSM se convierte en un flujo de salida. Ambos patrones presentaron un flujo en la parte exterior de la bahía que entra por PSM rodea la ITS y sale por PB de alta intensidad con valores de hasta 0.30 m s^{-1} .

Para una profundidad debajo de los 10 m el patrón de circulación vertical se comporta de acuerdo a lo observado en otros estudios, con velocidades de ligeramente menor intensidad alrededor de 0.27 m s^{-1} pero con la misma dirección sureste, el cual muestra el flujo de entrada de PSM.

9. Referencias

- Álvarez-Sánchez, L. G. (1971). Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. 54 pp.
- Álvarez-Sánchez, L.G. (1977). Vientos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, 4(1): 81-89.
- Álvarez-Sánchez, L. G., R. Hernandez Walls y R. Durazo-Arvizu, 1988. Patrones de deriva de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, 14: 135-162.
- Argote, M., F. Gavidia, A. Amador. (1991). Wind induced circulation in Todos Santos Bay, BC. México. *Atmósfera* (4): 101-115.
- Barton, E.D. (1985). Low-Frequency variability of currents and temperatures on the Pacific continental shelf off northern Baja California, 1978 to 1979. *Continental Shelf Research*, 4(4): 425-443.
- Barton, E.D. y M.L. Argote (1980). Hydrographic variability in an upwelling área off northern Baja California in june 1976. *Journal of Marine Research*, 38(4): 631-649.
- Bryan, K. y Cox, M. (1969). A numerical method for the study of the circulation on the world ocean. *J. Comp. Phys.*, 4: 347-376.
- Castro R., A. Pares-Sierra, S. G. Marinone. (2003). Evolución y extensión de los vientos Santa Ana de febrero de 2002 en el océano, frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 29: 275-281.
- Castro R, A. Mascarenhas, A. Martínez, R. Durazo And E. Gil-Silva, (2006). Spatial influence and oceanic thermal response to Santa Ana events along the Baja California peninsula. *Atmósfera*, 19: 195-211.
- Budgell, W. (2005). Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region. *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-005-0008-3.
- Cervantes-Audelo, I.G. (2013). Análisis de circulación y dispersión en la Bahía de Todos Santos, Baja California. Tesis de Licenciatura. Universidad del Mar, Puerto Ángel Oaxaca. 61 pp.
- Costa, P., B. Gómez, A. Venancio, E. Perez, V. Pérez-Muñuzuri. (2012). Using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to improve the sea surface temperature predictions of the MERCATOR Ocean System. The Coastal and Marine Geology Program U.S. Geological Survey.
- Di Lorenzo, E., A. Moore, H. Arango, B. Cornuelle, A. Miller, B. Powell, B.B. Chua. (2007). Weak and strong constraint data assimilation in the inverse Regional Ocean Modeling

- System (ROMS); Development and application for a baroclinic coastal upwelling system. *Ocean Modelling*, 16: 160-187.
- Durazo, R y Baumgartner T.R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 64: 7-31.
- Flores-Vidal X., Durazo R., Navarro L.F., Dominguez F., Gil E. (2015) Fine-scale tidal and sub-tidal variability of an upwelling-influenced bay as measured by the Mexican High Frequency Radar Observing System. In: *Coastal Ocean Observing System: Advances and Syntheses* (ISBN:9780128020227), Elsevier. Chapter 12. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802022-7.00012-2>
- Gavidia, F. (1988). Simulación numérica de la circulación barotrópica en la Bahía de Todos Santos, Baja California. MSc. Tesis, CICESE, Ensenada, México.
- Grijalva-Chon J. M., R. Castro-Longoria, M. Gregory-Hamman, (1985.). Temperatura y visibilidad en la Bahía de Todos Santos, B. C., México, octubre de 1982 a septiembre de 1983. *Ciencias Marinas*, 11: 39-48.
- Larrañaga M. J. (2013) Variabilidad de la circulación superficial en la Bahía Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas.
- Linacre L., R. Durazo, J.M. Hernández-Ayón, F. Delgadillo-Hinojosa, G. Cervantes-Díaz, J.R. Lara-Lara, V. Camacho-Ibar, A. Siqueiros-Valencia, C. Bazán Guzmán. (2010). Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal monitoring observatory: Station ENSENADA. *Continental Shelf Research*, 30: 1730-1742.
- Lynn, R. y Simpson, J. (1987). The California Current System: The Seasonal Variability of its Physical Characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92(C12): 12.947-12.966.
- Marinone, S.G. y Mateos E. (2013). Circulation in the deep canyon at the entrance to Todos Santos Bay, México, Is there a deep net outflow? *Continental Shelf Research*, 69: 17-20.
- Mateos, E., S.G. Marinone, A. Parés-Sierra. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, Mexico. *Ocean Modelling*, 27: 107-112.
- Mason, E., M.J. Molemaker, A.F. Shchepetkin, F. Colas, J.C. McWilliams, P. Sangra (2010). Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Modelling*, 35: 1-15.
- Miranda, L.E. (2012). Caracterización de las corrientes en las entradas y alrededor de la Bahía de Todos Santos. MCs Tesis, CICESE, Ensenada, México. 68 p.
- Morales-Zúñiga, C. (1977). Variaciones estacionales de la temperatura en la Bahía de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*, 4(1): 23 - 33.
- Rivas, D., R. Mancilla-Rojas, E. García-Mendoza, A. Almazán-Becerril. (2010). Lagrangian Circulation in Todos Santos Bay and off Baja California During Spring 2007:

Exploratory Experiments. The Ocean, The Wine, and The Valley: The Lives of Antoine Badan. 173-201.

Shchepetkin, A. y McWilliams, J. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Oceanic Modelling*, 9: 347-404

Torres, C. R., A. Mejía, M. L. Argote, I. Ramírez and M. Mancillas. (2006). Three-dimensional circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B. C. México. In *Simulación y Modelado en Ingeniería y Ciencias*. B. Gámez, D. Ojeda, G. Larrazabal, M. Cerrolaza (Eds). Ed. SVMNI, pp. MF-115 a MF-122. ISBN:980-00-2315-1.

Anexos

Tabla II. Coordenadas geográficas de estaciones utilizadas como referencias para los diferentes ejercicios realizados como validación de datos (CALCOFI, IMECOCAL, BTS) y comparación de datos con respecto a otros trabajos (BTS vel).

Campaña	Lance	Estación	Coordenadas Geográficas	
			Lat	Lon
CALCOFI	86.7	33.0	33.88	-118.49
		35.0	33.82	-118.62
		40.0	33.65	-118.97
CALCOFI	90	27.7	33.48	-117.74
		28.0	33.48	-117.76
		30.0	33.41	-117.90
		35.0	33.25	-118.24
		37.0	33.18	-118.38
		45.0	33.91	-118.93
CALCOFI	93.3	26.7	32.95	-117.30
		28.0	32.91	-117.39
		30.0	32.84	-117.53
		35.0	32.67	-117.87
		40.0	32.51	-118.21
		45.0	32.34	-118.55
		50.0	32.17	-118.89
		55.0	32.01	-119.23
IMECOCAL	100	30.0	31.68	-116.77
		32.0	31.61	-116.67
		35.0	31.52	-117.11
BTS	A1		31.892	-116.821
BTS	B1		31.766	-116.875
BTS	C1		31.710	-116.741
BTS Velocidad	Isla		31.834	-116.792
BTS Velocidad	Centro		31.863	-116.775
BTS Velocidad	SM		31.883	-116.763
BTS Velocidad	SMC		31.902	-116.750
BTS Velocidad	RB		31.752	-116.669
BTS Velocidad	PBI		31.711	-116.761