

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA
CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

“APLICACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO
TRIDIMENSIONAL EN EL PUERTO DE ENSENADA,
BAJA CALIFORNIA, MÉXICO”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANÓLOGO
PRESENTA
CÉSAR ALFONSO CORONADO MÉNDEZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. ENERO DE 2003

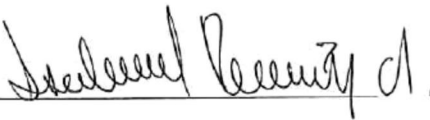
Resumen

Recientemente, el proyecto SIBEO ha impulsado la investigación de la calidad del agua del Puerto de Ensenada, en Baja California. Con el objetivo de evaluar el efecto de un flujo de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de agua limpia y oxigenada, se aplicó el modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM (Estuary and Lake Computer Model) en el Puerto. ELCOM es una herramienta de simulación numérica que utiliza modelos hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento temporal de cuerpos de agua estratificados sometidos a forzamientos ambientales. Los procesos de simulación incluyen respuestas baroclínicas y barotrópicas, efectos rotacionales, forzamientos de marea, viento, calentamiento de la superficie y transporte de sal. Se realizaron campañas de campo para obtener una batimetría detallada del puerto (mayo 2002) y para obtener datos hidrogáficos para establecer condiciones iniciales, de frontera y para validar el modelo (septiembre de 2002). El modelo se aplicó sobre una malla cartesiana con $40 \text{ m} < \Delta x < 210 \text{ m}$ y $40 \text{ m} < \Delta y < 290 \text{ m}$, con un paso de tiempo $\Delta t = 20 \text{ s}$ y forzado con series de tiempo de marea, radiación solar, cobertura de nubes, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y humedad relativa. Los resultados de la simulación sugieren que la onda de marea que entra por el canal de acceso al puerto domina la circulación además de un efecto importante del viento cuando su velocidad es mayor de 5 m s^{-1} . La descarga del SIBEO se comportó como una intrusión en una capa intermedia de la columna de agua, con poca influencia en el fondo. Los resultados de temperatura del modelo concuerdan satisfactoriamente con las mediciones obtenidas en el puerto.

“APLICACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO
TRIDIMENSIONAL EN EL PUERTO DE ENSENADA,
BAJA CALIFORNIA, MÉXICO”

TESIS
QUE PRESENTA:
CÉSAR ALFONSO CORONADO MÉNDEZ

APROBADA POR:



Presidente del Jurado

Dr. Ma. Isabel Ramírez Aguilar



Sinodal Propietario

M.C. Rafael Hernández Walls



Sinodal Propietario

Dr. Carlos Torres Navarrete

Dedicatoria

A mi madre...

A mis hermanos...

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento y reconocimiento a la Dr. Isabel Ramírez por haber dirigido este trabajo, y por haberme soportado durante casi dos años, aún con mi terquedad, mi sintaxis descuidada, mi verbosidad y mis redundancias. La forma de trabajo que impuso en mi es una lección de vida que, aunque no siempre comprendí, ahora sé que es necesaria para destacar en ese mundo de competencia que es la ciencia y para sobrevivir la burocracia que conlleva.

También a mis sinodales, M.C. Rafael Hernández Walls y Dr. Carlos Torres Navarrete por su disposición para revisar la tesis. Sus correcciones y sugerencias enriquecieron de manera importante este trabajo.

Le agradezco a CONACyT por haberme apoyado económicamente por medio de una beca Tesis de Licenciatura (Ref. 33354 T). Este último agradecimiento se extiende hacia todos los mexicanos que pagan impuestos, por costear mis estudios. A la Administración Portuaria Integral por el apoyo y las facilidades brindadas durante los trabajos de campo realizados en el Puerto de Ensenada. También agradezco a la Secretaría de Marina / Dirección General de Investigación y Desarrollo / Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada por facilitarme datos meteorológicos y mareográficos a través de la Red Mareográfica Nacional y la Red Meteorológica Marítima de la Armada de México.

Al Prof. Jörg Imberger por haberme apoyado para poder realizar la visita al Centre for Water Research de la University of Western Australia, por facilitarme una licencia del modelo y por las sugerencias en las que se basa gran parte de esta tesis.

El agradecimiento más sincero a todas las personas que forman la estructura administrativa de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC y el Departamento de Oceanografía Física del CICESE por el soporte brindado durante mi carrera y durante

la redacción de la tesis. En particular, mil gracias a las secretarias de la FCM, a las secretarias del Departamento de Oceanografía Física y de la División Oceanología de CICESE, al Ocean. Rafael Ramírez, M.C. Víctor Godínez y al Sr. Martín Lucero. También un agradecimiento a mis cuates de oficina Andrés Ortíz y Xavier Flores por hacer más llevaderas las horas de trabajo.

Al haber venido a vivir a Ensenada perdí todo lo que tenía, pero ahora me he dado cuenta que gané una vida completamente nueva. Definitivamente no hubiera podido haber sobrevivido sin el apoyo de mis amigos de mi generación NAUTILUS, mejor conocidos como los borrachos de los Pólipos.

Un agradecimiento especial al Pelvis, Ñet, Tucán, Hormiga y Marén, Seco, Cerdo, Kbork, Juma, Bobby, Enano, Chancro, Momo y Moma, Fox y Dunia, Lizz, Hommy, Beba, Camelia, Zayda, Gina, Karel, Denisse, Peludo y Peluda, Alfredo, al Chupi (pero no a los Chupis, que, sabéndolo o no, me hicieron la vida de cuadritos), Teri, al Vlad, al Beto y al Sami y Claudia. También a los Mazatlecos y compañía, a mis amigos los Tirrines y a mis amigos los Hot-Spots. Existe otra gente que tengo en el corazón pero me voy a permitir omitir nombres.

Un agradecimiento muy, muy, muy especial a la Kena, por haberme dado la fuerza, la confianza y el entusiasmo para seguir adelante cuando estuve lejos y ahora. Gracias...

También un agradecimiento enorme a mi madre, que hizo un esfuerzo extraordinario para apoyarme durante toda mi vida.

Y gracias al águila que, aunque ocupada comiéndose su serpiente y cuidando de no espinarse, siempre ha estado velando por mí.

Índice general

Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	IX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	6
1.2. Objetivo	8
2. Metodología	9
2.1. Modelación numérica	9
2.2. Datos de entrada	11
2.2.1. Batimetría	11
2.2.2. Hidrografía	18
2.2.3. Forzamientos	20
2.2.4. Condiciones iniciales	24
2.3. Simulaciones	27
2.3.1. Paso de tiempo	27
2.3.2. Periodo de simulación	28
2.4. Salidas del modelo	28
3. Resultados y discusiones	31
3.1. Secciones verticales	31
3.1.1. Temperatura	32
3.1.2. Trazador 2	42
3.2. Secciones horizontales	49

3.2.1. Velocidades	49
3.2.2. Trazador 1	55
3.2.3. Trazador 2	58
3.3. Validación	61
4. Conclusiones	69
Literatura citada	70

Índice de tablas

2.1. Especificaciones técnicas del GPSMAP 185 Sounder	12
2.2. Entradas para configuración de las simulaciones con ELCOM	30
3.1. Características de los grupos de datos obtenidos	32

Índice de figuras

1.1. Localización del Puerto de Ensenada	5
2.1. Recorrido para obtener la batimetría del Puerto de Ensenada.	13
2.2. Batimetría del Puerto de Ensenada	15
2.3. Discretización vertical de la batimetría	17
2.4. Localización de los lances de CTD	19
2.5. Datos meteorológicos 27-Sep-2002 al 04-Oct-2002	23
2.6. Condiciones iniciales de T y S. Estaciones B y D	25
2.7. Condiciones iniciales de T y S. Estaciones E y F	26
3.1. Localización de las secciones verticales	33
3.2. Sección vertical 1: Distribución vertical de la temperatura entre las 08:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002.	36
3.3. Sección vertical 1: Distribución vertical de la temperatura entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002.	37
3.4. Sección vertical 4: Distribución vertical de la temperatura entre las 08:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002.	38
3.5. Sección vertical 4: Distribución vertical de la temperatura entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002.	39
3.6. Sección vertical 5: Distribución vertical de la temperatura entre las 10:50 27-Sep-2002 a las 04:50 27-Sep-2002.	40
3.7. Sección vertical 5: Distribución vertical de la temperatura entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002.	41
3.8. Sección vertical 1: Distribución vertical del trazador 2 entre las 10:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002.	44
3.9. Sección vertical 1: Distribución vertical del trazador 2 entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002.	45
3.10. Sección vertical 4: Distribución vertical del trazador 2 entre las 16:50 27-Sep-2002 a las 16:50 28-Sep-2002.	46
3.11. Sección vertical 5: Distribución vertical del trazador 2 entre las 10:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002.	47

3.12. Sección vertical 5: Distribución vertical del trazador 2 entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002.	48
3.13. Superficie libre: Velocidades y distribución horizontal de la rapidez entre las 12:50 27-Sep-2002 a las 14:50 28-Sep-2002	52
3.14. Promedio vertical: Velocidades y distribución horizontal de la rapidez entre las 12:50 27-Sep-2002 a las 14:50 28-Sep-2002.	53
3.15. Promedio vertical: Velocidades y distribución horizontal de la rapidez entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 02:50 04-Oct-2002.	54
3.16. Promedio en la vertical: Distribución horizontal del trazador 1 entre las 12:50 27-Sep-2002 y las 14:50 28-Sep-2002.	56
3.17. Promedio en la vertical: Distribución horizontal del trazador 1 entre las 00:50 03-Oct-2002 y las 02:50 04-Oct-2002.	57
3.18. Capa 12: Distribución horizontal del trazador 2 entre las 12:50 27-Oct-2002 a las 14:50 28-Sep-2002.	59
3.19. Capa 12: Distribución horizontal del trazador 2 entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 08:50 04-Oct-2002.	60
3.20. Serie de tiempo de temperatura para la estación A	63
3.21. Serie de tiempo de temperatura para la estación B	64
3.22. Serie de tiempo de temperatura para la estación C	65
3.23. Serie de tiempo de temperatura para la estación D	66
3.24. Serie de tiempo de temperatura para la estación E	67
3.25. Serie de tiempo de temperatura para la estación F	68

Capítulo 1

Introducción

El océano costero recibe actualmente gran atención debido a una creciente utilización de sus recursos. Las demandas para aumentar su desarrollo han dirigido a gobiernos y empresas a investigar los mecanismos básicos que dirigen su circulación. El conocimiento de la hidrodinámica es un factor básico para las pesquerías, el clima, el impacto ambiental, la contaminación, la ingeniería costera y las maniobras marítimas.

Debido a la complejidad de los procesos oceánicos y de la zona costera es una práctica común hacer representaciones simplificadas de procesos físicos, químicos o biológicos, buscando las leyes naturales que gobiernan tales procesos y bajo ciertas condiciones, encontrar una solución para un problema específico. Estas simplificaciones, abstraídas del complejo oceánico, forman lo que se conoce como *modelo*, una estructura conceptual, basado en el conocimiento obtenido de observaciones y razonamiento inductivo, representado por una combinación de elementos físicos y matemáticos. Conforme nuestra sociedad ha llegado a ser cada vez más dependiente de la información y la tecnología la modelación ha ganado una mayor importancia. La mayor parte de esta modelación se lleva a cabo utilizando computadoras, lo que constituye la modelación numérica. En modelación numérica, el prototipo es descrito por un conjunto de números mientras el comportamiento de ese prototipo en espacio y tiempo es descrito por conjuntos de operaciones en esos números.

Por su naturaleza, la mayoría de los modelos numéricos usan métodos computacionales para resolver expresiones matemáticas que describen fenómenos físicos, químicos y biológicos. El uso de algunos métodos computacionales, tales como aproximación

e iteración realizadas por computadoras digitales de alta velocidad permiten la solución de ecuaciones complejas que no pueden ser resueltas por métodos analíticos. Los pasos básicos implicados en la adaptación de un modelo numérico para un sistema dado se pueden resumir como sigue:

1. Definir la naturaleza del problema
2. Reducir el problema a alguna forma matemática adecuada (las ecuaciones básicas que forman el modelo matemático).
3. Hacer todas las simplificaciones posibles, considerando la importancia relativa de cada aspecto del problema.
4. Reemplazar las ecuaciones simplificadas por un sistema en diferencias finitas u otro sistema finito de ecuaciones.
5. Establecer una representación del dominio (normalmente en forma matricial) en espacio y en tiempo.
6. Definir las fronteras del dominio y las condiciones en estas fronteras.

Una vez que un modelo numérico se ha formulado y ha sido validado puede proporcionar rápidamente resultados para condiciones diferentes. Por otro lado, los modelos están limitados por la habilidad del modelador para derivar y resolver con precisión las expresiones matemáticas que representan los procesos a simular (USACE, 1989).

Los tipos de modelos más importantes para la investigación de la circulación costera son (USACE, 1989):

- Modelos hidrodinámicos: describen las componentes de velocidad, elevación de la superficie, y la distribución de salinidad, temperatura (o cualquier constituyente pasivo).
- Modelos de transporte de sedimentos: predicen la respuesta de la costa (erosión o acreción) eventos naturales o modificaciones antropogénicas.
- Modelos de calidad del agua: estiman las características físicas y las concentraciones de los componentes químicos del agua.

- Modelos ecológicos: predicen las interacciones entre la calidad del agua y las comunidades acuáticas.

Los modelos numéricos se pueden clasificar como uni, bi, o tridimensionales. Los modelos unidimensionales tratan el sistema promediando sobre una sucesión de secciones transversales. Estos modelos son aceptables en situaciones tales como canales con sección transversal relativamente uniforme y con líneas centrales cuyo radio de curvatura es relativamente grande comparado con la anchura, asumiendo que la densidad del agua es uniforme sobre la sección transversal. Los modelos bidimensionales promediados en profundidad son los más comúnmente empleados y son adecuados para estudios en áreas donde la columna de agua está relativamente bien mezclada. Los modelos bidimensionales lateralmente promediados se usan en estudios de cuerpos de agua relativamente profundos y estrechos, con una variación vertical de la densidad significativa (USACE, 1989).

Evidentemente, los modelos bidimensionales promediados vertical o lateralmente son incapaces de describir la estructura detallada de campos de velocidad y distribución de temperatura y salinidad, cuando esto implica el plano que ha sido promediado. Esto es especialmente cierto en el caso de flujos recirculantes generados por el viento o sobre una topografía compleja. Una descripción más completa puede ser resuelta por modelos tridimensionales. Estos son descripciones en términos de tres variables independientes del espacio, que generalmente varían con respecto al tiempo (Abbott y Price, 1993).

Los esfuerzos para describir la circulación costera tridimensional iniciaron en los setentas con los trabajos de Liggett (1969), Leendertse *et al.* (1973), Heaps (1973) y Sundermann (1975). Desde 1990, con el desarrollo de esquemas semi-implícitos de diferencias finitas, una familia de modelos TRIM (Tidal, Residual, Intertidal Mudflat), desarrollada por V. Casulli y colaboradores (Casulli, 1990; Casulli y Cheng, 1992; Casulli y Cattani, 1994; Casulli, 1997; Casulli y Stelling, 1998; Casulli, 1999; Casulli y Walters, 2000; Cheng y Casulli, 2002) han sido aplicados para resolver flujos en 2D y 3D, usando o no aproximaciones hidrostáticas. TRIM ha sido aplicado en diversos casos de estudio, tales como circulación en la Bahía de San Francisco (Cheng *et al.*, 1993) y patrones de mezcla y plumas boyantes en la laguna de Barbamarco en Italia (Ramírez e Imberger, 2002). Derivado de este modelo, Ben R. Hodges de la University

of Western Australia desarrolló el Estuary and Lake Computer Model (ELCOM) (Hodges *et al.*, 1999). El método numérico de ELCOM toma su estructura básica del esquema de TRIM, con adaptaciones para mejorar su precisión, la conservación de escalares, la difusión numérica y el desarrollo de un esquema de cerradura basado en una capa de mezcla por viento.

Área de estudio

El Puerto de Ensenada está localizado a $116^{\circ}37'30''$ Long O y a $31^{\circ}51'30''$ Lat N, aproximadamente a 100 km al sur de la frontera México-EUA y sobre la margen noroeste de la Bahía de Todos Santos (BTS) (Fig. 1.1). Es un puerto de altura con una área de 1.98 km^2 , protegido por un rompeolas de 1640 m de longitud construido de enrocamiento. Limita al norte con playas predominantemente rocosas, intercaladas con algunas playas de bolsillo donde el material va desde arenas hasta cantos rodados (VanDooren-Osio, 1991). Al sur colinda con una extensa playa arenosa, donde desemboca el arroyo El Gallo, con una descarga de $23\,000 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ de aguas residuales de la planta de tratamiento de la ciudad (Jiménez-Pérez *et al.*, 1992). Dentro del puerto se reciben las descargas estacionales del arroyo Ensenada. El Puerto de Ensenada ofrece facilidades a buques de carga, pesqueros, turísticos y yates deportivos. Tiene 23 zonas de atraque, de las cuales siete son de uso público y siete áreas de almacenamiento. El canal principal tiene una longitud de 900 m y una profundidad de 13 m. La dársena de ciaboga es de 200 m, y entre 9.5 y 12 m de profundidad (Torres-Rodríguez y Gómez-Morín, 1989).

Desde la construcción del rompeolas una sección del puerto ha quedado aislada y estancada, haciéndola vulnerable a la acumulación de contaminantes (Orozco y Gutiérrez, 1983; Arce, 1984; Morales, 1984; Sañudo *et al.*, 1985; Delgadillo y Orozco, 1987; Segovia y Rivera, 1988; Delgadillo y Orozco, 1989). A pesar de que las regulaciones actuales previenen una acumulación mayor de contaminantes, los agregados existentes en los sedimentos son suficientes para mantener altos niveles de contaminación a pesar de la acción de las mareas (Czitrom-Bauss *et al.*, 2002).

Como una alternativa al saneamiento del puerto, ha sido propuesta una bomba activada con energía del oleaje SIBEO (*SI*stema de *B*ombeo por *E*nergía de *O*leaje), desarrollada en la Universidad Nacional Autónoma de México (Czitrom-Bauss *et al.*,

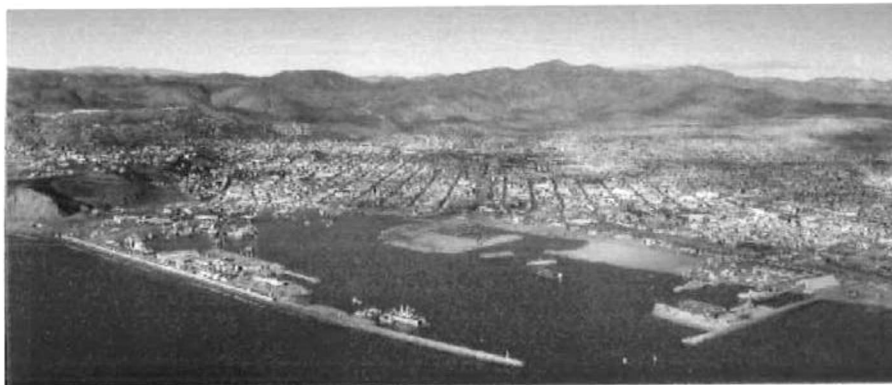
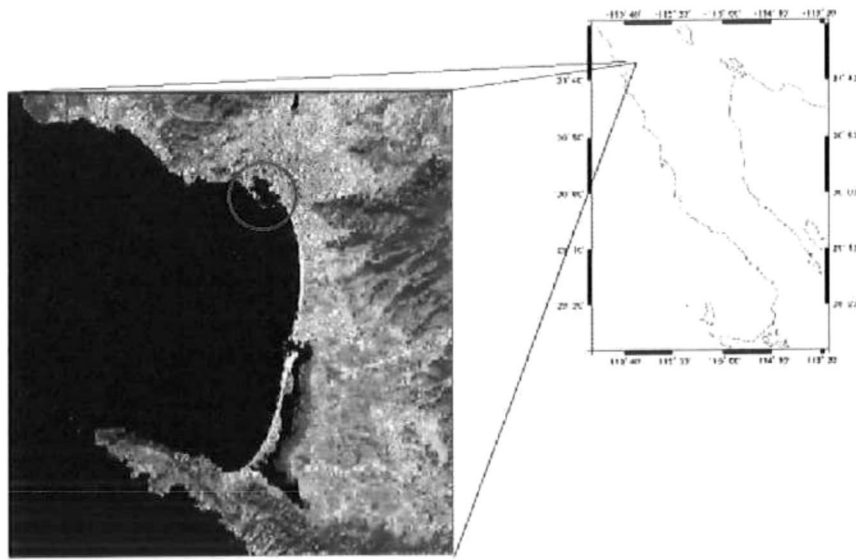


Figura 1.1: Localización del Puerto de Ensenada.

2002), para inyectar agua limpia y oxigenada del exterior del puerto en las secciones más estancadas del puerto.

1.1. Antecedentes

Ensenada es una ciudad localizada al noroeste de México, 100 km al sur de la frontera con Estados Unidos. Tiene una población de 411 785 con un crecimiento anual de 4 %. Los principales factores en el desarrollo económico de la ciudad son el turismo, la pesca, la agricultura y la industria maquiladora. La ciudad está localizada a las orillas de uno de los puertos más importantes del Pacífico mexicano. El Puerto de Ensenada tiene vocación múltiple con importante actividad pesquera, turística y de transporte de carga. El puerto cuenta con aduanas para manejar carga de altura y de cabotaje, contenedores, carga a granel y perecederos; una zona apropiada para las actividades de la industria atunera; navieras y astilleros; una zona de desarrollo náutico-turística además de una región para manejo de carga mineral. La localización del Puerto de Ensenada en la Cuenca del Pacífico y su cercanía a dos de los puntos de mayor concentración de carga a escala mundial, los puertos de Los Angeles y Long Beach en Estados Unidos, así como las tendencias de crecimiento del puerto en materia de comercio internacional, se traducen en una derrama económica importante en su zona de influencia local. La región tiene 45 parques y centros industriales, tres aduanas fronterizas y una marítima en el puerto de Ensenada y 1,130 maquiladoras. Los indicadores económicos de esta zona han mejorado sustancialmente desde la implantación del TLCAN, propiciando la modernización y el crecimiento de la infraestructura portuaria y terrestre (API, 2002).

El clima de la región es del tipo mediterráneo, con temperatura media anual de 16 °C con una oscilación anual promedio de 9.6 °C. El verano es fresco con niebla frecuente a lo largo de la costa; el régimen de lluvias es invernal con precipitación anual promedio de entre 200 y 300 mm. La humedad relativa promedio es de 78.5 % (SEMAR, 1974). Los vientos en la costa NO de Baja California presentan variaciones estacionales relacionadas con la posición y magnitud de un centro de baja presión localizado fuera de la costa. El gradiente de este centro de presión aumenta en primavera y verano, produciendo fuertes vientos del norte. En invierno, vientos más

débiles y de dirección variable son producidos por el debilitamiento del gradiente de presión (Argote-Espinoza *et al.*, 1991).

El estudio de los patrones de circulación en la Bahía de Todos Santos (BTS) comenzó en 1971 con un estudio de Álvarez-Sánchez (1971). Se observó que en la zona cercana a la costa, el movimiento de la capa superficial fue principalmente hacia el sureste, en forma de una corriente paralela a la costa. Se detectaron variaciones en la velocidad, atribuidas a la marea.

Ocampo-Torres (1983) reportó datos de un corrientímetro instalado al sur de la bahía, cerca de la barra del Estero de Punta Banda, a 10 m de profundidad. Los datos, que comprenden entre febrero y junio de 1982 muestran una rapidez de la corriente muy variable, entre 1 cm s^{-1} y 15 cm s^{-1} . También la dirección fue variable, con el modo más predominante entre 50° y 70° .

La corriente inducida por el viento fue estudiada por Hernández-Walls (1986) usando un modelo analítico lineal estacionario. Al aplicar un viento típico de brisa marina de 6 m s^{-1} , determinó tendencias de circulación en algunas zonas de la costa.

Con experimentos de boyas de deriva Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) obtuvieron valores de velocidad lagrangeana de la corriente superficial, la constancia de la dirección de las trayectorias y la razón de separación relativa de dichos trazadores. Encontraron las corrientes fueron más intensas de marzo a agosto ($>15 \text{ cm s}^{-1}$), mientras que entre septiembre y enero se observaron corrientes más débiles ($<5 \text{ cm s}^{-1}$), aparentemente asociadas con variaciones estacionales del esfuerzo del viento. Analizando más detenidamente los datos de cuerpos de deriva, Durazo-Arvizu y Álvarez-Sánchez (1988) localizaron una zona frente a la barra del Estero de Punta Banda con valores máximos de divergencia y vorticidad, que atribuyen a un proceso activo de mezcla por gradientes laterales de velocidad.

Argote-Espinoza *et al.* (1991) aplicaron un modelo barotrópico bidimensional para predecir la circulación inducida por el viento en la BTS. Utilizando condiciones representativas de viento de verano, invierno y vientos "Santana", encontraron velocidades máximas cerca de la costa de Punta San Miguel, aparentemente inducidas por efectos topográficos. Este trabajo considera que el viento es el forzamiento más importante de la circulación.

Recientemente, el proyecto SIBEO ha impulsado los estudios hidrodinámicos y de

calidad del agua en el Puerto de Ensenada. El SIBEO ha sido propuesto para promover la ventilación de las secciones más estancadas del puerto inyectando agua limpia y oxigenada del exterior. En este contexto, Czitrom-Bauss *et al.* (2002) aplicaron en el Puerto de Ensenada un modelo bidimensional barotrópico, similar a HAMSOM (Hamburg Shelf Ocean Model) y un modelo de transporte de partículas pasivas. Encontraron una circulación residual con giros que atrapan las partículas en la zona norte del puerto y mostraron que un flujo de 600 l s^{-1} es capaz de sanear la zona norte del sistema. Sin embargo, para evaluar el comportamiento de la descarga de la bomba, es necesario un conocimiento detallado de la estructura vertical de la salinidad, la temperatura y las corrientes ya que el puerto no puede ser considerado un cuerpo de agua verticalmente homogéneo.

1.2. Objetivo

El objetivo general de este trabajo es aplicar el modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM (Hodges *et al.*, 1999) para simular el patrón general de la circulación en el Puerto de Ensenada, con énfasis en la descripción de su estructura vertical. Este objetivo contempla los siguientes objetivos particulares:

1. Obtener el comportamiento hidrodinámico de la circulación tridimensional en el Puerto de Ensenada para evaluar el alcance y evolución del efecto de un flujo del SIBEO de 1000 l s^{-1} .
2. Validar el modelo con datos de campo, por medio de series de tiempo de temperatura

Capítulo 2

Metodología

2.1. Modelación numérica

Para la modelación hidrodinámica del Puerto de Ensenada se utilizó el Estuary and Lake Computer Model (ELCOM), desarrollado por B. R. Hodges en el Centre for Water Research (CWR), de la University of Western Australia (UWA). ELCOM es una herramienta de simulación numérica tridimensional para lagos, reservorios y estuarios que aplica modelos hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento temporal de cuerpos de agua estratificados sometidos a forzamientos ambientales. El modelo es capaz de simular respuestas barotrópicas y baroclínicas, efectos rotacionales, forzamiento por marea, viento, calentamiento de la superficie libre, gradientes de densidad, afluentes y efluentes, además del transporte de sal, calor y escalares pasivos. Está diseñado para el estudio de sistemas acuáticos por escalas de tiempo de semanas a meses (aunque el límite práctico lo establece el tamaño de malla y la capacidad de cómputo disponible) *e.g.* para comparar patrones de circulación en mareas vivas y muertas.

La simulación hidrodinámica resuelve las ecuaciones de conservación de momento para fluidos incompresibles usando un esquema semi-implícito adaptado de la familia de modelos TRIM y basado en el método de Euler-Lagrange cuadrático para la advección del momento con una solución de gradiente conjugado para la superficie libre. El esquema de transporte es explícito, usando el filtro conservativo ULTIMATE aplicado con el método de interpolación de tercer orden QUICKEST (Leonard, 1991).

El modelo se resuelve sobre una malla cartesiana rectangular que permite Δx y Δy variable, con Δz variable como función de z pero horizontalmente uniforme. El *stencil* está basado en la malla de Arakawa-C (Arakawa y Lamb, 1977) con las velocidades definidas en las caras de la celda mientras que la concentración de los escalares y la altura de la superficie libre están definidas en el centro.

En el fondo se impone una condición de no-deslizamiento (Dirichlet) y una condición de gradiente-cero (Neumann) a los escalares. La simulación de la turbulencia está basado en un modelo de capa de mezcla por viento, transportando momento desde la superficie por medio de mezcla en regiones con gradientes de densidad inestables (Hodges, 2000). Así se elimina la inversión de una matriz tridiagonal para cada componente de la velocidad, tal y como es el esquema original de TRIM. De esta manera se obtiene una mayor eficiencia numérica y permite mantener gradientes pronunciados de densidad.

La base de ELCOM son las ecuaciones de Navier–Stokes con la aproximaciones hidrostática y de Boussinesq, y las ecuaciones de transporte escalar con una aproximación por viscosidad turbulenta en la horizontal. Escritas para el espacio cartesiano con el eje x_3 (o z) vertical, positivo hacia arriba son:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_{z'}^{\eta} \rho' dz + \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(\nu \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_\beta} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \overline{u_3 u_\alpha} - \epsilon_{\alpha\beta} f U_\beta \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} (C U_j) = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(\kappa \frac{\partial C}{\partial x_\beta} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \overline{u_3 c} + S \quad (2.2)$$

Se usa notación tensorial con la convención de sumas de Einstein, aplicada al espacio tridimensional para los subíndices latinos (*e.g.* $j = 1, 2, 3$) y al espacio horizontal de dos componentes para los subíndices griegos (*e.g.* $\alpha = 1, 2$). El tensor permutación de dos componentes $\epsilon_{\alpha\beta}$ está definido de tal manera que $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 0$; $\epsilon_{12} = 1$; $\epsilon_{21} = -1$. La altura de la superficie es η , mientras que f es el parámetro de Coriolis; ν y κ son los parámetros de viscosidad turbulenta y difusividad turbulenta, y S representa fuentes escalares. Las letras latinas mayúsculas y minúsculas distinguen a los promedios 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.*, 1999).

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.*, 1999):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_b^\eta U_\alpha dz \quad (2.3)$$

ELCOM ha sido usado y validado en estudios de ondas internas y circulación de mediana escala en Lago Kinneret en Israel (Yeates, 1999; Hodges *et al.*, 1999; Antenucci *et al.*, 2000; Antenucci y Imberger, 2000), e intercambio estuarino en Lago Maracaibo en Venezuela (Laval *et al.*, 2001a,b), así como en otros estudios en Australia, Grecia y Japón.

2.2. Datos de entrada

ELCOM requiere como datos de entrada los siguientes: batimetría, series de tiempo de los forzamientos ambientales, condiciones iniciales y condiciones de frontera. A continuación se describe cada uno de ellos.

2.2.1. Batimetría

La batimetría utilizada aquí se obtuvo con datos de una campaña de campo durante los días 11 y 15 de Mayo de 2002 (Coronado-Méndez *et al.*, 2002). Se utilizó una embarcación a la que se adaptó un GPS ¹ con ecosonda (modelo Garmin GPSMAP 185 Sounder), conectado a una computadora portátil. Las especificaciones técnicas del GPS se presentan en la tabla 2.1. Se utilizó un receptor de GPS diferencial (DGPS) para mejorar la exactitud de este sistema. El receptor DGPS utiliza una señal de radio de una estación en tierra localizada en Point Loma, CA, EUA (a 100 km del área de estudio) para corregir los datos de posición recibidos del satélite. El uso de DGPS mejora la exactitud de la información geográfica de 15 m a 2 m, dependiendo de las condiciones meteorológicas, que afectan la calidad de la señal de radio recibida de la estación en tierra.

¹Acrónimo de *Geographical Positioning System*

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del GPSMAP 185 Sounder

Característica	Especificación
Receptor GPS	Receptor diferencial, de 12 canales paralelos
Razón de muestreo	1/segundo
Coordenadas	Lat/Lon, UTM/UPS
Exactitud en posición	15 metros, 1-5 metros con DGPS
Exactitud en velocidad	0.1 km/h
Interfaces	NMEA 0183, RTCM 104 correcciones DGPS
Frecuencia de ecosonda	200 kHz
Poder de transmisión	200 W
Rango de profundidad	0.5 - 400 m
Exactitud en profundidad	0.1 m
Alarmas	Agua somera/profunda
Tamaño	157 mm x 160 mm x 67 mm
Peso	0.816 kg
Pantalla	141 mm diagonal, LCD de escalas de grises
Rango de temperatura	-15°C to 70°C

Se realizaron varios transectos en el interior del puerto y una región adyacente a éste (Fig. 2.1). Los transectos estaban separados aproximadamente 50 m entre ellos. Una velocidad constante de 10 km h⁻¹ y una frecuencia de muestreo de 3 Hz permitieron una resolución al metro más próximo sobre el recorrido, permitiendo generar matrices con resolución de 50 m sin necesidad de interpolación. Se obtuvieron alrededor de 12 500 datos de profundidad, que fueron capturados en un archivo de texto con hora, longitud, latitud y profundidad (negativa). La marea astronómica referida al NMM, interpolada al tiempo correspondiente, fue sumada a los valores de profundidad para corregir los datos de batimetría por el cambio en el nivel del mar.

Se usó un programa de MS-EXCEL para convertir las posiciones latitud-longitud al sistema UTM². Existen diversas ventajas al usar coordenadas UTM en lugar de latitud y longitud: el sistema coordenado UTM es métrico con base 10, por lo que las distancias pueden ser medidas directamente en metros. En cambio, el sistema Lat y Long es en coordenadas esféricas y las líneas de longitud convergen en los polos, por lo que una diferencia de, *e.g.* 3 minutos entre dos puntos no puede ser una medida

²Universal Transversal Mercator

confiable de distancia, ya que esta distancia depende de la distancia al Ecuador. El método de conversión utiliza las “Fórmulas Redfearn”; por favor diríjase a DLI (2000) para mayor información.

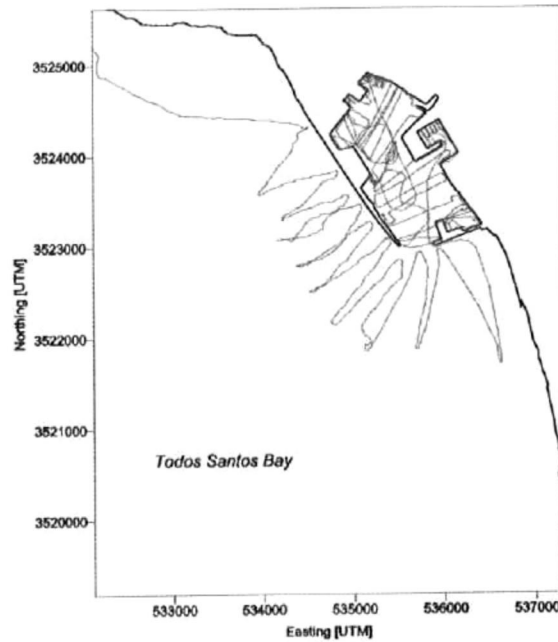


Figura 2.1: Recorrido para obtener la batimetría del Puerto de Ensenada.

Debido a la discretización espacial explícita que utiliza ELCOM, la exactitud de cálculos en 3D generalmente se ve reducida cuando el flujo no está alineado a la cuadrícula computacional. Ya que el rompeolas y el eje principal del puerto están desviados de la dirección de la malla, resultaría inconveniente utilizar Norte–Este como el sistema de referencia principal. Por esta razón, la matriz de profundidades que representa la malla fue rotada 58° en contra de las manecillas del reloj por medio de una transformación de coordenadas sobre las posiciones UTM x y y . Primero, las coordenadas son convertidas de cartesianas a polares:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right), r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.4)$$

El ángulo de rotación (58°) puede ser sumado directamente a θ (en radianes):

$$\theta_t = \theta + \frac{58}{180}\pi \quad (2.5)$$

La transformación es completada regresando de coordenadas polares a cartesianas:

$$x_t = r \cos(\theta_t), y_t = r \text{sen}(\theta_t) \quad (2.6)$$

La interpolación de la malla transformada se hizo con la opción "Gridding" en *SURFER* (Golden Software). Las mallas se generaron con el método de 'Triangulación con interpolación lineal', con una resolución de 40 m. La malla obtenida se muestra en la figura 2.2.

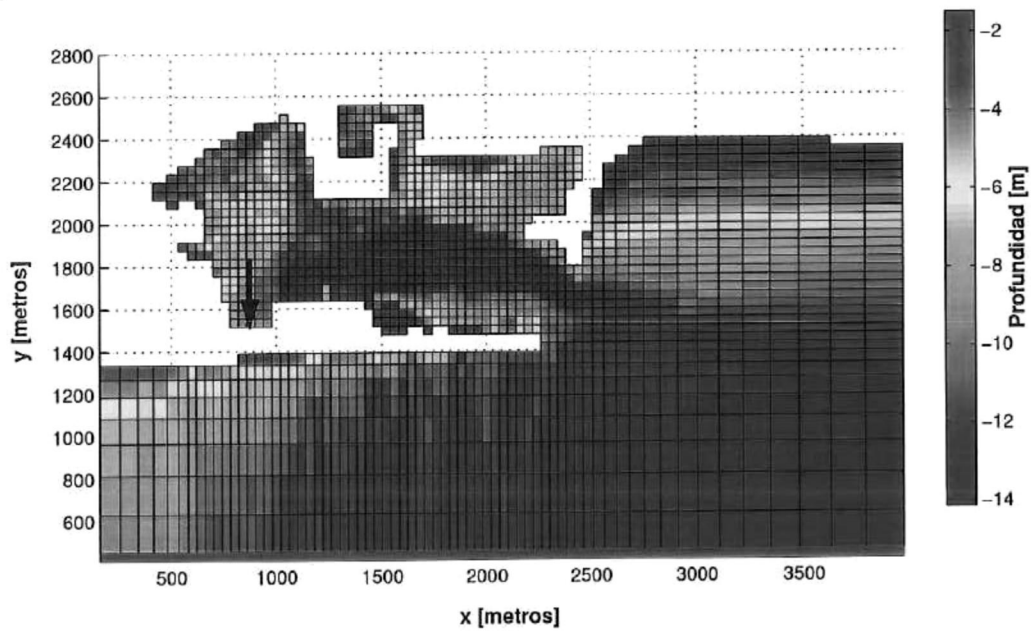


Figura 2.2: Batimetría del Puerto de Ensenada, 41 filas por 71 columnas, con cuadrícula de tamaño variable, con $40\text{ m} < \Delta x < 210\text{ m}$ y $40\text{ m} < \Delta y < 290\text{ m}$. La flecha negra indica la celda definida como el afluente para la bomba SIBEO. La frontera abierta se muestra como una línea roja y cierra la batimetría en línea recta frente al rompeolas.

ELCOM permite diseñar una estructura en la vertical de capas horizontales de grosor variable. Se usaron 22 capas con Δz variable, desde 1 m cerca de la superficie, disminuyendo gradualmente hasta 0.5 m a los 7 m de profundidad, aumentando nuevamente hasta 1 m para la capa del fondo. De esta manera fue posible obtener una malla más fina para regiones de mayor interés (termoclina), logrando un buen balance entre resolución y desempeño del modelo. La figura 2.3 muestra la configuración vertical asignada a la batimetría.

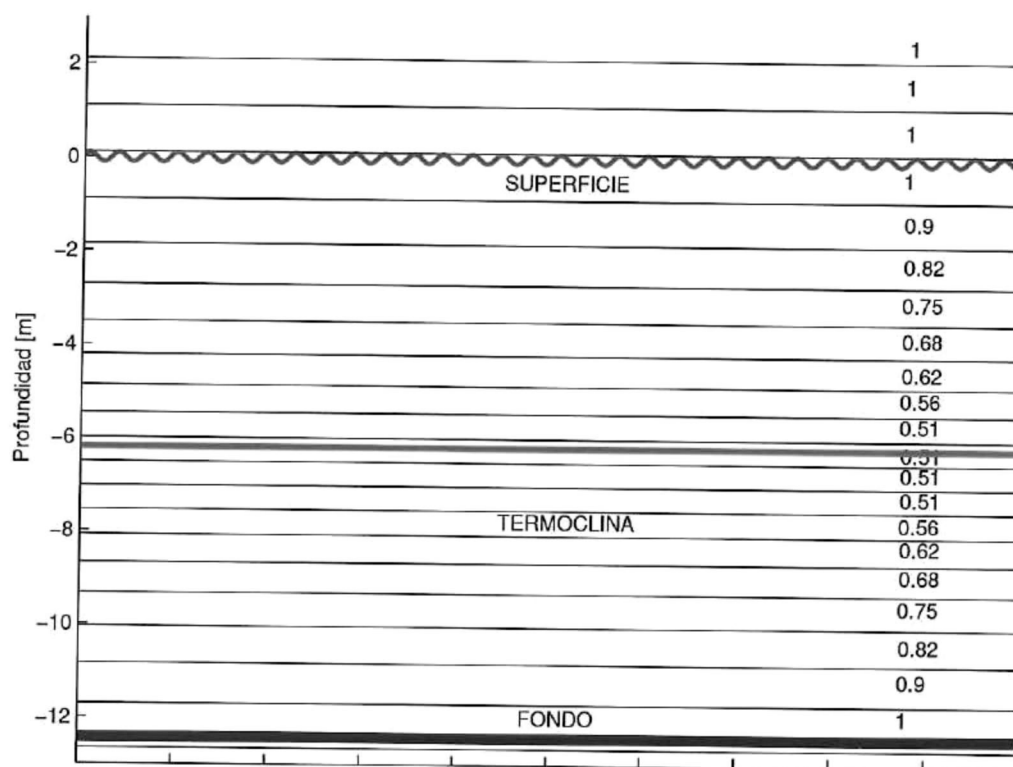


Figura 2.3: Discretización vertical de la batimetría generada en el Puerto de Ensenada. La línea azul denota la superficie libre y la línea roja la profundidad promedio de la termoclina.

El paso final en el proceso de preparación de la batimetría de ELCOM fue identificar las celdas asignadas como tierra y las celdas de frontera abierta. La frontera abierta son aquellas celdas sobre las que actúa el forzamiento de la marea. ELCOM tiene la opción de especificar los valores de la cuadrícula que señalan la tierra y las celdas de frontera abierta.

2.2.2. Hidrografía

Se realizó una campaña de mediciones el día 27 de Septiembre de 2002, con el objetivo de obtener datos de salinidad y temperatura para establecer las condiciones iniciales y de frontera. Se seleccionaron 6 puntos dentro del puerto (Fig. 2.4) por representar las zonas dinámicamente más importantes: boca de acceso (estaciones A,B y C); zona sur del puerto, frente a la terminal de Cementos y SEMAR, sobre la dársena principal (estación D); zona central, entre contenedores y cruceros, con profundidades máximas de 14 m (estación E); y la sección norte, con profundidades promedio de 6 m (estación F). Se utilizó un CTD marca Sea-Bird modelo SBE19plus con una frecuencia de muestreo de 4 Hz, operado autónomamente a través del interruptor magnético. Posteriormente los datos se transfirieron vía conector serial a una computadora personal para su procesamiento. Se hicieron lances consecutivos desde las 08:50 hrs, en orden A,B,C,D,E,F, . . . , repitiendo el ciclo cada 40 minutos. De esta manera se lograron un total de 54 perfiles, 9 para cada estación.

El procesamiento de los datos se realizó siguiendo el manual del SBE19plus y consistió en aplicar un filtro (FILTER) pasa-bajas a la conductividad con una constante de 0.5 s; la presión fue filtrada con pasa-bajas con una constante de 1 s. Posteriormente se avanzó (ALIGNCTD) la temperatura relativa a la presión 0.5 s. Los perfiles se promediaron cada 0.1 m (BINAVG) y se calcularon la salinidad, densidad, velocidad de descenso y la profundidad (DERIVE) (Sea-Bird, 2002).

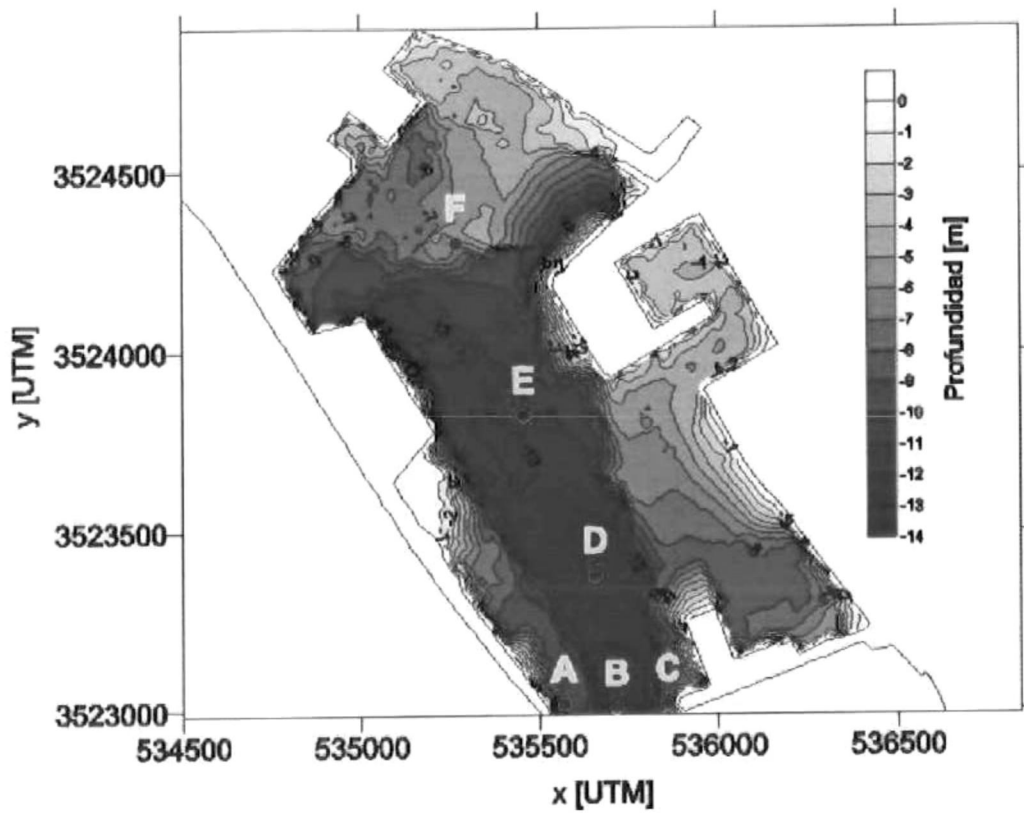


Figura 2.4: Localización de los lances de CTD realizados en la campaña de campo PE270902, con el objetivo de obtener las condiciones iniciales y de frontera de salinidad y temperatura en el Puerto de Ensenada.

2.2.3. Forzamientos

El modelo es forzado con series de tiempo de marea, radiación solar, cobertura de nubes, temperatura del aire, humedad relativa, y velocidad y dirección del viento. Las series de tiempo requieren un formato que consiste en un encabezado, seguido por columnas de datos. La primer columna debe tener el tiempo en día juliano; las siguientes columnas contienen los datos para ese instante en el tiempo. El usuario no necesita dar información para el mismo intervalo de tiempo que la simulación usa (Δt): el modelo interpola linealmente para encontrar el valor apropiado para un instante de tiempo específico.

Marea

ELCOM aplica el forzamiento de marea especificando la altura del nivel del mar en la frontera abierta. La altura del nivel del mar se obtuvo de un mareógrafo colocado en el muelle de las instalaciones de Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR), ubicado en la esquina sureste del Puerto de Ensenada. Se construyó una serie de tiempo de Enero hasta Octubre de 2002, con datos cada 5 minutos. Los datos de marea fueron corregidos para tener como referencia el nivel medio del mar. La serie de tiempo de marea entre el 27 de Septiembre al 2 de Octubre de 2002 se muestra en la figura 2.5.

Calentamiento superficial

El módulo de termodinámica de superficie de ELCOM controla los flujos de calor en la superficie libre. Es necesario proporcionar al modelo información en series de tiempo de: radiación solar, cobertura de nubes, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y humedad relativa.

Se utilizaron datos horarios provistos por la Estación de Investigación Oceanográfica de SEMAR, que cuenta con una estación meteorológica en la esquina sureste del puerto. Los datos se proporcionaron en un archivo de texto con la siguiente información: fecha, temperatura del aire, humedad, punto de rocío, velocidad y dirección del viento, lluvia y presión atmosférica. El dato de punto de rocío no es requerido por el modelo, mientras que la presión atmosférica es un forzamiento opcional pero que no

se consideró necesario ya que el efecto por el cambio del nivel del mar está implícito en la medición del mareógrafo. La figura 2.5 muestra la información meteorológica entre los días 27 de Septiembre al 2 de Octubre de 2002.

La radiación solar fue calculada con un algoritmo basado en la radiación de onda corta incidente en el tope de la atmósfera con atenuación y considerando un cielo nuboso (Tennessee Valley Authority, 1972):

$$q_{o_{top}} = \frac{I_0}{r^2} \text{sen}(\alpha) \quad (2.7)$$

donde $q_{o_{top}}$ es la intensidad de la radiación solar por unidad de área en Wm^{-2} ; I_0 es la constante solar, $1367 Wm^{-2}$; r es el vector de radio normalizado, definido por la ecuación 2.9; α es la altitud solar en radianes.

La altitud solar está relacionada con la latitud por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{sen}(\alpha) = \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cos(h) \quad (2.8)$$

donde ϕ es la latitud del área de estudio en radianes; δ es la declinación solar, en radianes, dado por la ecuación 2.10; h es el ángulo horario local del sol, en radianes, definido en 2.11. Valores aproximados de r y δ pueden ser calculados con las siguientes fórmulas (Tennessee Valley Authority, 1972):

$$r = 1 + 0,017 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(186 - D)\right) \quad (2.9)$$

$$\delta = 23,45(\pi/180) \cos\left(\frac{2\pi}{365}(172 - D)\right) \quad (2.10)$$

donde D es el día juliano. El ángulo horario local se puede determinar con:

$$h = (HR - 12) \left(\frac{\pi}{12}\right) \quad (2.11)$$

donde HR es la hora del día. Una vez que han sido calculadas las fluctuaciones estacionales al tope de la atmósfera, se puede determinar la radiación de onda corta incidente en la superficie. Fue usado un algoritmo simple que asume un grosor de la atmósfera constante, con un promedio en la cobertura de nubes. El modelo, derivado de Tennessee Valley Authority (1972):

$$IS = I_0 z (1 - (0,65 PC^2)) \quad (2.12)$$

donde IS es la radiación en la superficie del agua; z es la fracción de luz que pasa a través de la atmósfera, sin considerar la nubosidad (se usó un valor estándar de $z = 0,14$), y PC es la cobertura de nubes para el tiempo en cuestión. La serie de tiempo obtenida se muestra en la figura 2.5.

Viento

ELCOM es capaz de modelar escenarios con viento que varía en espacio, tiempo y dirección. Ya que la única fuente de datos de viento es la estación meteorológica de SEMAR en este trabajo se aplicó viento con velocidad y dirección uniformes en todo el dominio, variando en tiempo según la serie de datos proporcionada (Fig. 2.5).

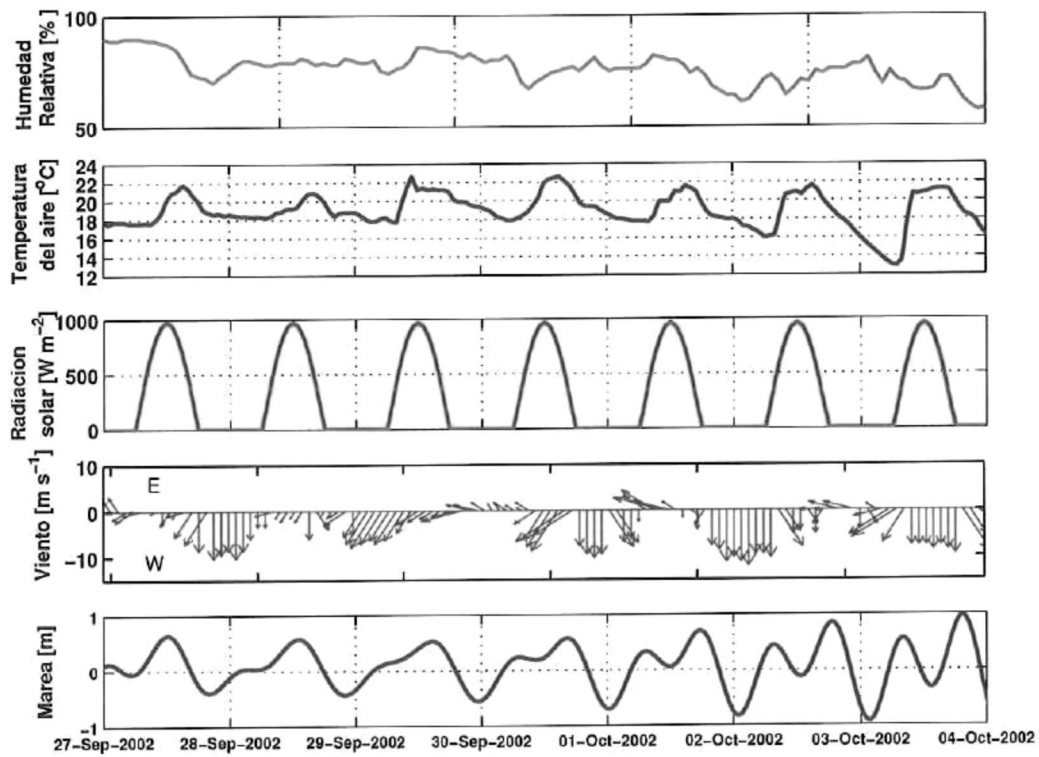


Figura 2.5: Datos meteorológicos y marea para el Puerto de Ensenada, entre el 27 de Septiembre y el 4 de Octubre de 2002. Se utilizó una cobertura de nubes constante de 0.2.

2.2.4. Condiciones iniciales

Temperatura y salinidad

El dominio del puerto se dividió en cuatro secciones, que representan las zonas descritas en la sección de Hidrografía (2.2.2), con centro en las estaciones B, D, E y F. La variación vertical de temperatura y salinidad para cada una de estas zonas se estableció con el primer perfil de CTD obtenido en la estación correspondiente y horizontalmente uniforme dentro de la zona (figuras 2.6 y 2.7).

Marea

La altura inicial del nivel del mar se asigna en el archivo de configuración de ELCOM, y debe concordar con el nivel del mar especificado en la serie de tiempo de marea para el instante en el tiempo en que comienza la simulación. Ésta inició a las 08:50 del 27 de Septiembre de 2002 por lo que la condición inicial para la marea se estableció en 0.276 m SNMM.

Trazadores

Se utilizaron trazadores pasivos para evaluar los efectos de los flujos planeados para las bombas SIBEO. Un trazador se inicializó confinado en el interior de la rada portuaria, con una concentración arbitraria, $C = 1$, mientras que al resto del dominio se le asignó una $C = 0$. Para los afluentes que simulan los SIBEOS, así como para la frontera abierta la concentración de este trazador se asignó en cero. Se utilizó un segundo trazador con condición inicial para todo el dominio, así como para la frontera abierta con $C = 0$. El afluente que simula los SIBEOS se asignó con concentración $C = 1$.

El primer trazador (en lo subsecuente llamado trazador 1) tiene como objetivo evaluar el transporte de masa y la acción de la marea, como un enfoque alternativo al del método de corrientes residuales. El segundo trazador (trazador 2), se usó para evaluar el comportamiento de la descarga del SIBEO, además de rastrear el destino de ésta conforme evoluciona en tiempo la simulación.

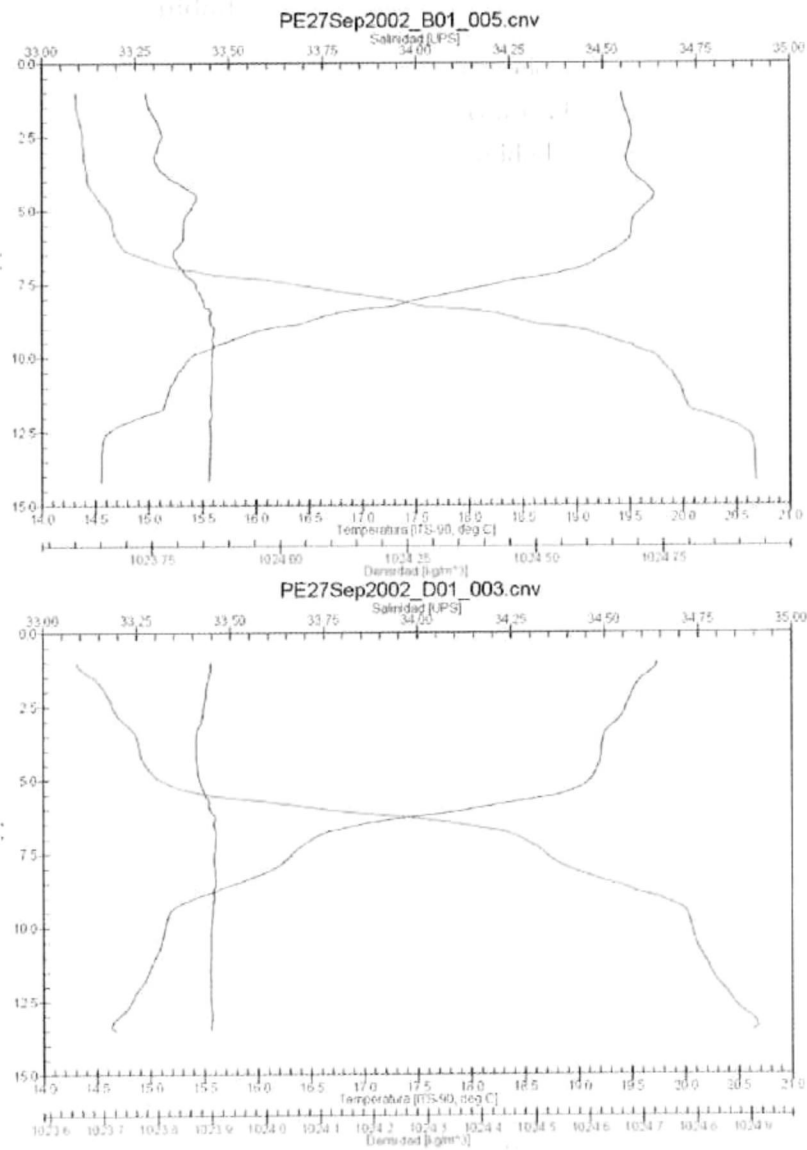


Figura 2.6: Perfiles de temperatura y salinidad con los que se establecieron las condiciones iniciales de la simulación para las estaciones B y D.

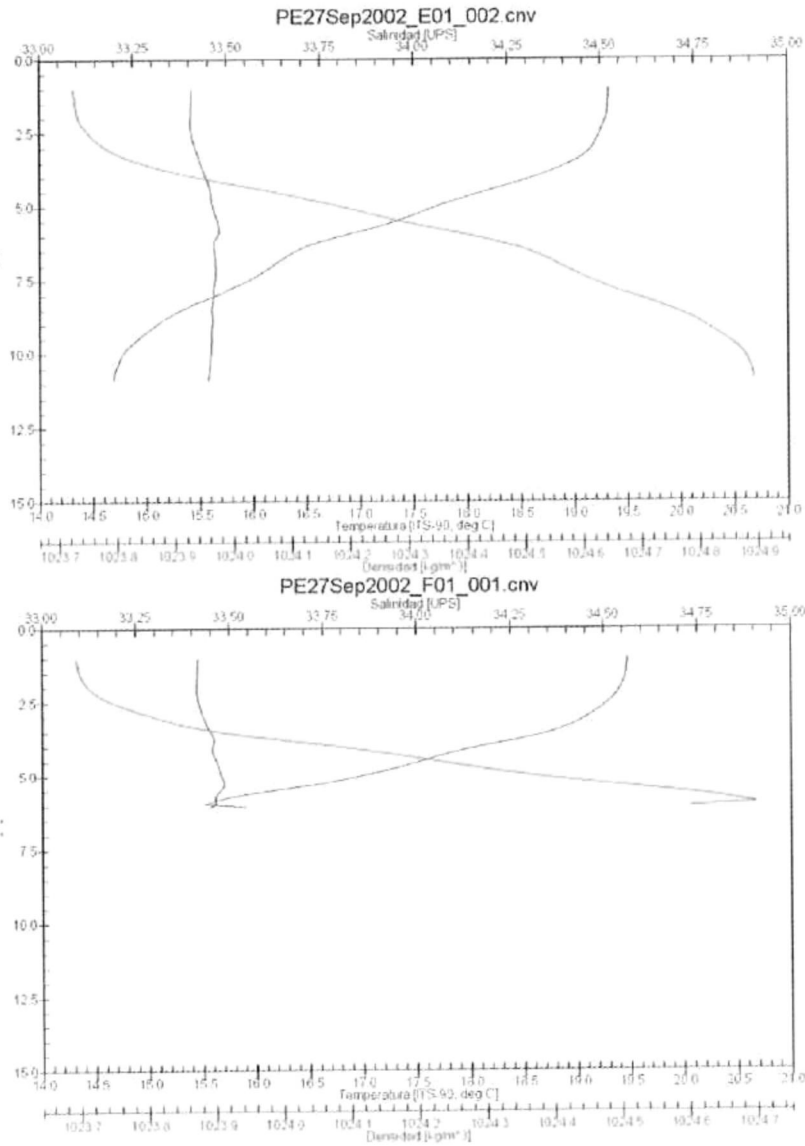


Figura 2.7: Perfiles de temperatura y salinidad con los que se establecieron las condiciones iniciales de la simulaci3n para las estaciones E y F.

2.3. Simulaciones

2.3.1. Paso de tiempo

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 flujos estratificados, el método de solución discretiza explícitamente los términos baroclínicos en la ecuación 2.1, por lo que existe una restricción en el tamaño de paso de tiempo, basada en la condición de Courant-Friedrichs-Lewy para ondas internas (CFL), tal que $CFL < \sqrt{2}$, o:

$$\sqrt{g'D} \frac{\Delta t}{\Delta x} < \sqrt{2} \quad (2.13)$$

Los términos de la izquierda se conocen como el número CFL baroclínico (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 valor de g' puede calcularse con:

$$g' = g \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right) \quad (2.14)$$

donde ρ_0 es una densidad de referencia. Se sustituyeron ρ y ρ_0 con datos obtenidos para el puerto, resultando en un valor de $g' = 0,0024 \text{ ms}^{-2}$ con $D = 15 \text{ m}$. Las ondas internas se propagan a $C \approx (g'D)^{1/2}$, resultando en una velocidad de $U = 0,189 \text{ ms}^{-1}$. Así, el paso de tiempo máximo para una condición CFL limitante es:

$$\Delta t < \frac{CFL \Delta x}{U} \quad (2.15)$$

Considerando el escenario más restrictivo, con $\Delta x = 40 \text{ m}$, y U del $O(1) \text{ ms}^{-1}$, se obtiene $\Delta t \approx O(10^2) \text{ s}$.

Una restricción que toma importancia cuando se usan pasos de tiempo grandes en modelos geofísicos es si el campo de la velocidad se puede considerar Lipschitz, esto es, si el campo es lo suficientemente suave para aproximación numérica con el tamaño de malla y paso de tiempo utilizados (Hodges *et al.*, 1999). La constante numérica Lipschitz \mathcal{B} se define como una condición que debe ser menor que la unidad:

$$\mathcal{B} = \left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\| \Delta t < 1 \quad (2.16)$$

Un método numérico puede ser estable para valores altos de \mathcal{B} , pero los resultados no serán exactos. Esto establece un límite fundamental en el tamaño de paso de tiempo que se puede usar razonablemente en un modelo como una función de la física del sistema en lugar de la estabilidad del método numérico.

Considerando esto, se hicieron varios cálculos para encontrar el paso de tiempo para las simulaciones realizadas en el Puerto de Ensenada. Se encontró que un paso de tiempo (Δt) de 20 segundos da un buen balance entre exactitud, estabilidad y desempeño, permitiendo una razón de tiempo real/simulación de alrededor de 10. Se tomaron marcos instantáneos de las simulaciones cada hora simulada y se guardaron en disco.

2.3.2. Periodo de simulación

Se realizaron varias pruebas con el objetivo de representar los escenarios típicos que se pueden esperar en el Puerto de Ensenada. Se decidió presentar aquí el experimento baroclínico, con todos los forzamientos disponibles, ya que los resultados obtenidos se asemejaron con mayor precisión a los datos de campo. La tabla 2.2 muestra la configuración que se usó en los parámetros de entrada de ELCOM.

La simulación se realizó para un periodo de 170 horas (7.1 días) con el objeto de documentar la transición entre el ciclo de marea muerta y viva. El modelo se configuró para iniciar a las 8:50 del 27 de septiembre, y finalizar a las 10:50 del 4 de Octubre de 2002. En el primer paso de tiempo, la marea se encontró ascendiendo, durante una fase de mareas muertas. Alrededor del 1 de Octubre, la marea empezó a tomar las características de mareas vivas, que se consideró con un impacto importante en la circulación en el Puerto de Ensenada. El periodo entre las 8:50 a las 19:50 del 27 de septiembre se usó para validar el desempeño del modelo con datos de temperatura tomados en el campo en estas fechas, mientras que el resto del tiempo simulado se usó para establecer las diferencias entre la circulación en marea viva y muerta.

2.4. Salidas del modelo

Los resultados de ELCOM son almacenados en el formato NETWORK Common Data Form (netCDF). Este formato es independiente de la plataforma y permite

que el procesamiento de los datos pueda ser realizado en Linux o MS Windows. Los archivos netCDF se procesaron y visualizaron mediante MATLAB. Se desarrolló una rutina para generar vistas horizontales y secciones verticales de las variables modeladas. Esta rutina hace uso de la naturaleza cuadrículada de los resultados de ELCOM, donde para cada tiempo $n\Delta t$, el modelo guarda datos para cada celda del dominio x - y . La información se guarda en series de arreglos tridimensionales, con el mismo formato que una matriz (arreglo bidimensional), excepto que el tiempo se guarda en la primera dimensión. Por lo tanto, un arreglo tridimensional guarda series de tiempo cuadrículadas.

de la simulación se ejecuta con el código de simulación ELCOM (Windward, Ecosystems, Land Use, and Coastal Modeling) desarrollado por el MVL/LAM. Se desarrolló una interfaz para el modelo que permite introducir los datos de las variables modeladas en el modelo.

Tabla 2.2: Entradas para configuración de las simulaciones con ELCOM

Parámetro	Unidades	Valor
Intervalo de x de la malla	Δx (m)	Variable, desde 40 m hasta 210 m.
Intervalo de y de la malla	Δy (m)	Variable, desde 40 m hasta 290 m.
Número de celdas computacionales	–	31 995
Paso de tiempo	Δt (s)	20
Simulación de termodinámica	–	✓
Simulación de temperatura	–	✓
Simulación de salinidad	–	✓
Simulación de densidad	–	✓
Simulación de trazadores	–	✓ (2)
Esquema de cerradura	–	Capa de mezcla por viento
Densidad de referencia del aire	ρ_a (kg m ⁻³)	1.25
Densidad de referencia del agua	ρ_w (kg m ⁻³)	1000 (UNESCO)
Coefficiente de fricción del fondo	C_f	5×10^{-3}
Tolerancia del m. de gradiente conjugado	–	10^{-32}
Viento	m s ⁻¹ y <i>dir</i> ^o	Serie de tiempo
Radiación solar	W m ⁻²	Serie de tiempo
Humedad relativa	[]	Serie de tiempo
Temperatura del aire	°C	Serie de tiempo
Marea	m	Serie de tiempo
Afluente del SIBEO	m ³ s ⁻¹	1
Tiempo modelado	días	7.12
Tiempo de CPU	horas	13.75
Razón modelo/tiempo CPU	–	12.43
Procesador	–	P4 1.5 GHz (Linux)

Capítulo 3

Resultados y discusiones

Los datos obtenidos con ELCOM se agrupan en tres categorías: a) secciones verticales, b) vistas horizontales y c) series de tiempo para una columna de agua. Un grupo se define como la salida del modelo para las variables especificadas, sobre una sección del espacio, que evoluciona en el tiempo. La cantidad de información obtenida puede aproximarse mediante la siguiente fórmula:

$$I_c = \frac{N_g N_v t_S}{n \Delta t} \quad (3.1)$$

donde I_c es la cantidad de información en número de figuras, N_g es el número de grupos, N_v es el número de variables, t_S el tiempo simulado, en segundos y $n \Delta t$ especifica el intervalo en que se guarda la información en disco. Un cálculo aproximado para las simulaciones realizadas en el Puerto de Ensenada, con $N_g = 14$, $N_v = 6$, $t_S = 613\,440$ s (7.1 días), $\Delta t = 20$ s y $n = 180$, resulta en una cantidad del $O(10^5)$ figuras. Por razones de espacio, sólo se presentan resultados de grupos seleccionados en base a los siguientes criterios: importancia dinámica, información representativa y la capacidad de validar estos resultados con datos de campo. La tabla 3.1 describe las características de los grupos que se presentan en este capítulo.

3.1. Secciones verticales

La figura 3.1 muestra la localización de las secciones verticales obtenidas con ELCOM. La posición de estas secciones se escogió en base a los muestreos de campo:

Tabla 3.1: Características de los grupos de datos obtenidos.

Categoría	Grupo	Comentario	Variabes
<i>Secciones Verticales</i>	Sección 1	Norte del puerto, entre SIBEO y pesqueras; zona de mayor estancamiento	T, trazador 2
	Sección 2	Boca de acceso	T, trazador 2
	Sección 3	Canal principal, en dirección N-S	T, trazador 2
<i>Secciones Horizontales</i>	Superficie	Superficie libre	Velocidades
	Capa 12	Promedio para una capa con $\Delta z = 0,51$ m a 6 m de profundidad	Trazador 2
	Promedio vertical	Valor promedio para cada columna de agua	Trazador 1, velocidades
<i>Perfiles verticales</i>	Perfiles A, B, C, D, E y F	Localizados en los mismos puntos en los que se hicieron los lances de CTD (validación)	T

(a) la sección vertical 1, sobre la zona de mayor estancamiento, en línea recta entre el área de las descargas del SIBEO, hasta la zona de pesca deportiva, con profundidad máxima de 10 m; (b) sección 2, en la boca de acceso al puerto, en línea recta entre las puntas del rompeolas y del espigón (profundidad máxima 13.6 m); (c) sección vertical 3, paralela al rompeolas, entre la zona de pesca y cabotaje, en línea recta hacia el exterior del puerto, en dirección a la playa sur de la bahía.

Las figuras 3.2 a 3.11 muestran con isolíneas la distribución de las variables simuladas. Los paneles representan marcos instantáneos para una fase de marea ; la fecha, hora y altura de marea se muestran abajo de cada panel. En la parte inferior derecha de cada figura se presenta la localización de la sección vertical sobre un mapa batimétrico del Puerto de Ensenada.

3.1.1. Temperatura

La distribución vertical de la temperatura para la zona de influencia del SIBEO se muestra en la figura 3.2. Esta sección evolucionó de la condición inicial como un sistema de tres capas (panel 1): una capa mezclada superficial de 3 m, una termoclina pronunciada, con un cambio de 19.5 °C a 15.5 °C entre los 3 y 6 m de profundidad,

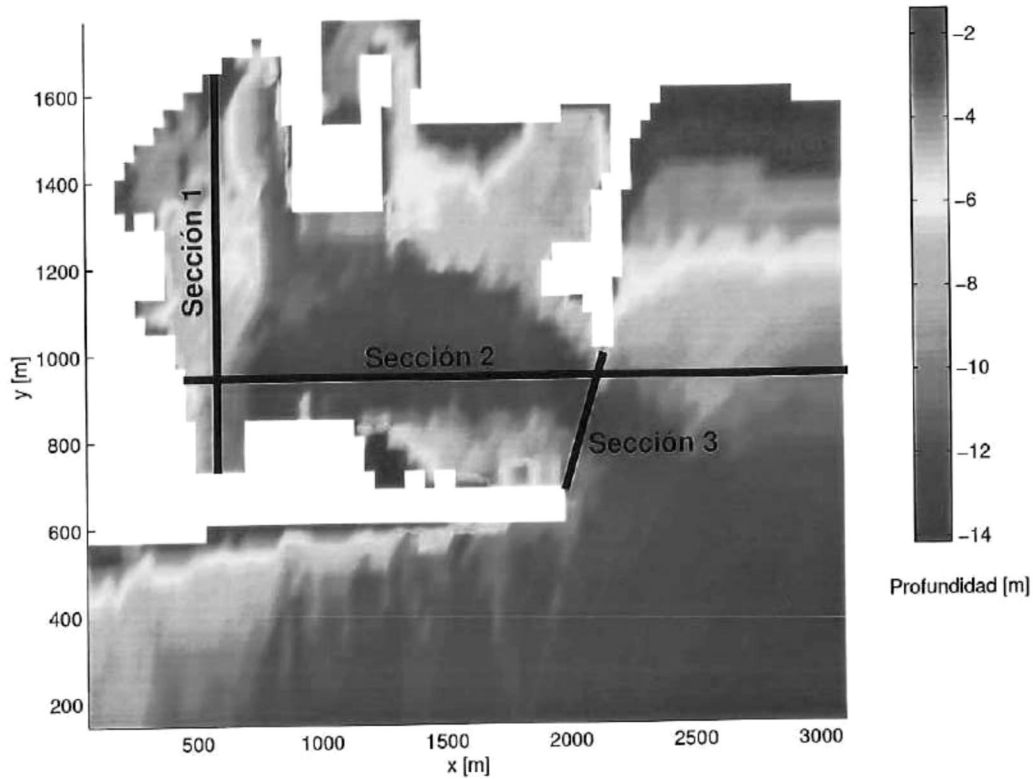


Figura 3.1: Localización de las secciones verticales obtenidas con ELCOM.

y una capa mezclada en el fondo, de 15.5 °C. Esta estratificación encontrada en la campaña de campo confirma la hipótesis inicial y justifica la aplicación de un modelo tridimensional. En la zona de la boca se observaron variaciones de 5 °C entre la superficie y el fondo, mientras que la variación en la región norte fue de 4 °C. El patrón de la salinidad mostró un patrón menos definido, ya que los datos de conductividad presentaron picos (*spikings*) asociados a la velocidad de descenso del CTD y a los gradientes pronunciados de temperatura (Fodzar *et al.*, 1985). Sin embargo, las variaciones de salinidad no fueron mayores a 0.1 UPS por lo que la estratificación observada puede considerarse función de la temperatura. Estudios recientes (Ramírez e Imberger, 2002; Balas y Ozhan, 2002) confirman la necesidad de aplicar modelos

tridimensionales en aguas costeras ya que los gradientes de densidad verticales y horizontales son importantes. Las principales fuentes de calor disponibles para generar esta estratificación son la radiación solar y la diferencia de temperatura entre el agua y el aire (Cheng *et al.*, 1993; Hodges *et al.*, 1999). Las simulaciones con ELCOM consideraron estas fuentes de calor, sin embargo existió una limitación importante debido a la naturaleza teórica de los datos de radiación solar. Las comparaciones de datos de campo y los resultados del modelo revelaron la importancia relativa de este forzamiento, ya que existieron discrepancias en el calentamiento superficial que se atribuyen a las diferencias entre la radiación solar real y la teórica.

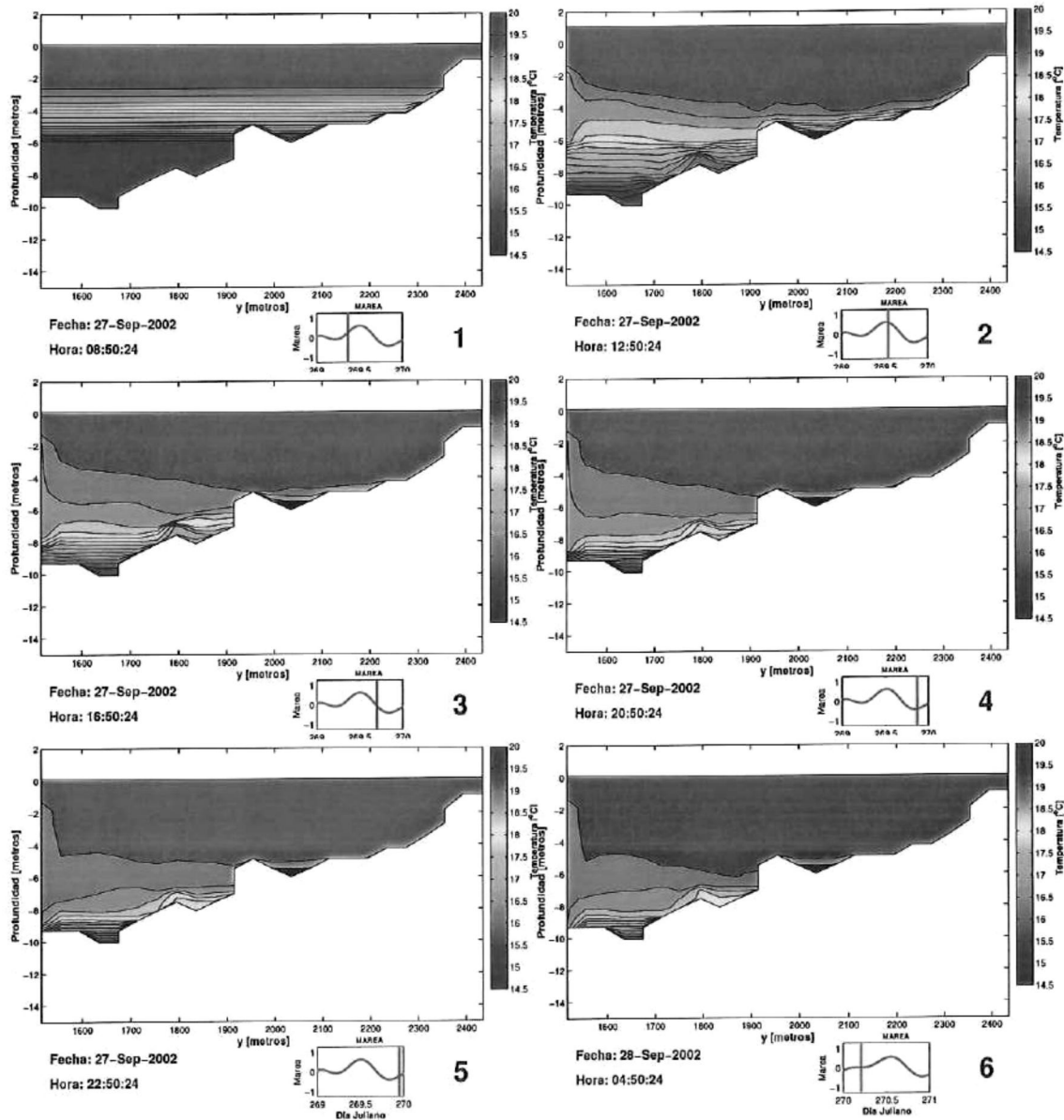
La salinidad y temperatura para la descarga del SIBEO se asignó con una serie de tiempo, correspondiente al agua proveniente de una profundidad de 8 m. Fue evidente el debilitamiento de la estratificación y el hundimiento de la isoterma de 19 °C, excepto en las regiones cercanas al SIBEO (lado izquierdo de cada panel). En esta zona se observó la intrusión de agua de menor temperatura que descendió abruptamente de 1 m a 6 m de profundidad (panel 6). Este resultado puede compararse con la distribución de la temperatura cinco días después, entre las 00:50 y las 22:50 del 3 de Octubre de 2002 (Fig. 3.3). Es notable el efecto persistente del afluente del SIBEO. Se puede observar que la temperatura de la capa mezclada descendió 1 °C, aunque mantuvo el mismo grosor. Este enfriamiento puede atribuirse a una ligera disminución de la radiación solar y a un descenso de la temperatura del aire (Fig. 2.5). El efecto del viento fue importante, considerando que a media mañana (paneles 2 y 3) la isoterma de los 18.5 °C fue horizontal, mientras que por la tarde (panel 4) presentó una pronunciada inclinación, aflorando a superficie en la zona cercana al SIBEO. Este fenómeno se explica con el efecto de la brisa marina hacia tierra, típica en Ensenada por las tardes. La noche de este día, al debilitarse la brisa, la isoterma comenzó a colocarse de manera horizontal, con ciertas ondulaciones en su frente, señal de la actividad de una onda interna con amplitud relativamente pequeña. También se apreciaron diferencias que podrían deberse a la marea, ya que durante el pleamar, la capa mezclada del fondo, limitada por la isoterma de los 15 °C, llegó a 7 metros, mientras que durante el bajamar, esta isoterma se hundió a 8.5 m.

La variación vertical de la temperatura en la boca de acceso se muestra en la figura 3.4. La estratificación observada en el panel 1 se debe a la condición inicial para

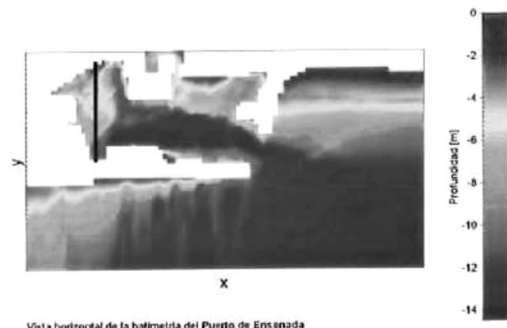
temperatura en esta zona (Fig. 2.6). Es notable la poca variación que se registró a lo largo del 27 de Septiembre (páneos 3 al 6). La estratificación se mantuvo a lo largo de todo el día, con un ligero debilitamiento durante el pleamar. Se observó una ondulación en la isoterma de los 19 °C al inicio del bajamar de las 20:50 hrs, causada posiblemente por remolinos que se generan en la boca durante el cambio entre flujo y reflujo. Este efecto fue más pronunciado durante la marea viva (panel 5 de la Fig. 3.5). La isoterma de 18.5 °C fue desplazada 4 metros hacia la superficie, y regresó a su nivel horizontal a 6 m de profundidad cuatro horas después, durante un reflujo de marea. Es notorio el descenso generalizado de la temperatura, comparado con la figura 3.4, debido posiblemente al descenso de temperatura del aire registrado ese día (Fig. 2.5).

Un resultado interesante producido por el modelo es la asimetría observada en la estructura vertical, en particular, en el arreglo de las isotermas en la boca. Esta asimetría sugiere que existe un forzamiento baroclínico que afecta al puerto desde la boca. En general, se tomaron precauciones para evitar que problemas relacionados con la metodología (*e.g.* la generación de la malla computacional) produjeran un sesgo en el comportamiento dinámico de la circulación. El siguiente paso lógico es realizar mediciones de campo para examinar con más cuidado el origen de las asimetrías observadas.

La sección 3, a lo largo del canal principal, ofrece una descripción más general de los procesos baroclínicos dentro del puerto, considerando que el gradiente de densidad está controlado principalmente por la temperatura. La figura 3.6 presenta un ciclo de marea muerta mientras que la figura 3.7 presenta un ciclo de marea viva. La prominencia ubicada a los 2400 m en el eje x es una extensión submarina del espigón del Gallo y señala el límite entre el exterior y el interior del puerto. Se observó un patrón de estratificación que se intensificó a lo largo del día, con un engrosamiento de la capa mezclada. Es evidente, observando las figuras 3.6 y 3.7 que la boca tiene un efecto importante en la dinámica, generando ondulaciones en el campo de temperatura de 2 m de amplitud. La zona profunda del canal principal, cerca del muelle de contenedores, permaneció relativamente estable.

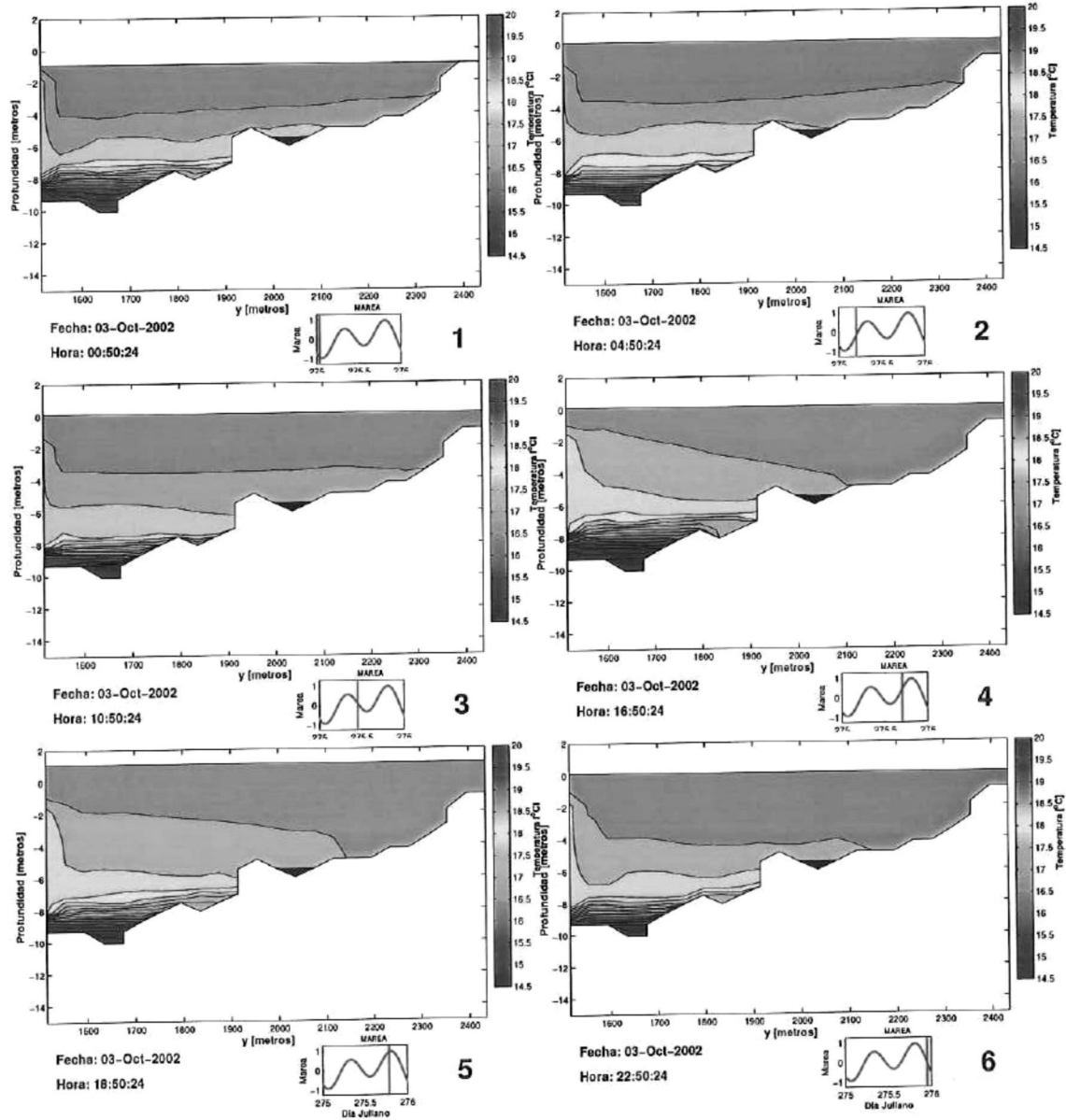


Sección 1 (SIBEO)



Vista horizontal de la balmetría del Puerto de Ensenada

Figura 3.2: Sección 1: Distribución vertical de la temperatura entre las 08:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002. La descarga del SIBEO está a la izquierda de cada panel.



Sección 1 (SIBEO)

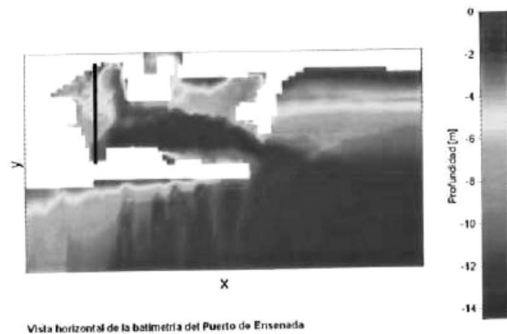
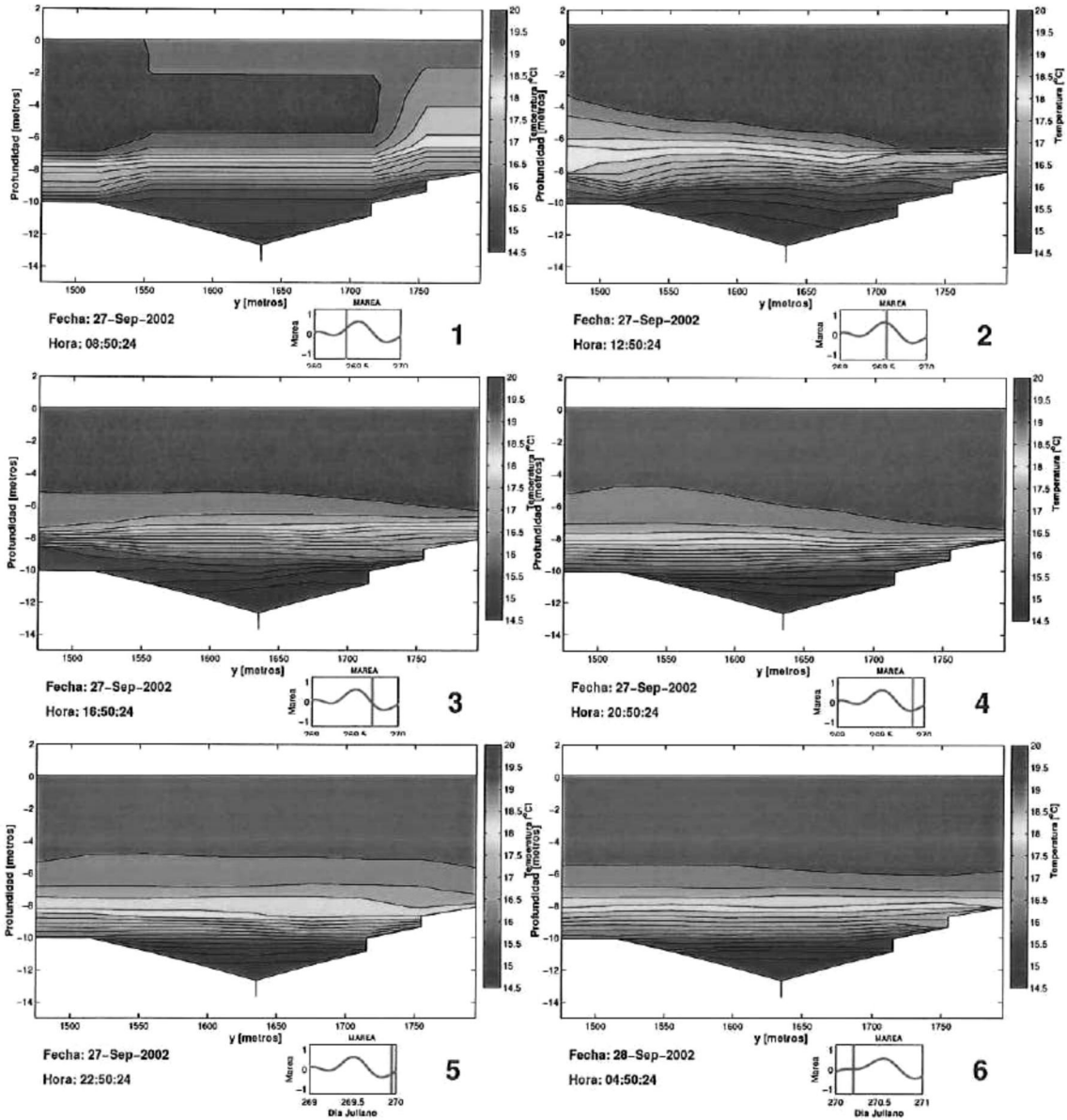


Figura 3.3: Sección 1: Distribución vertical de la temperatura entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002. La descarga del SIBEO está a la izquierda de cada panel.

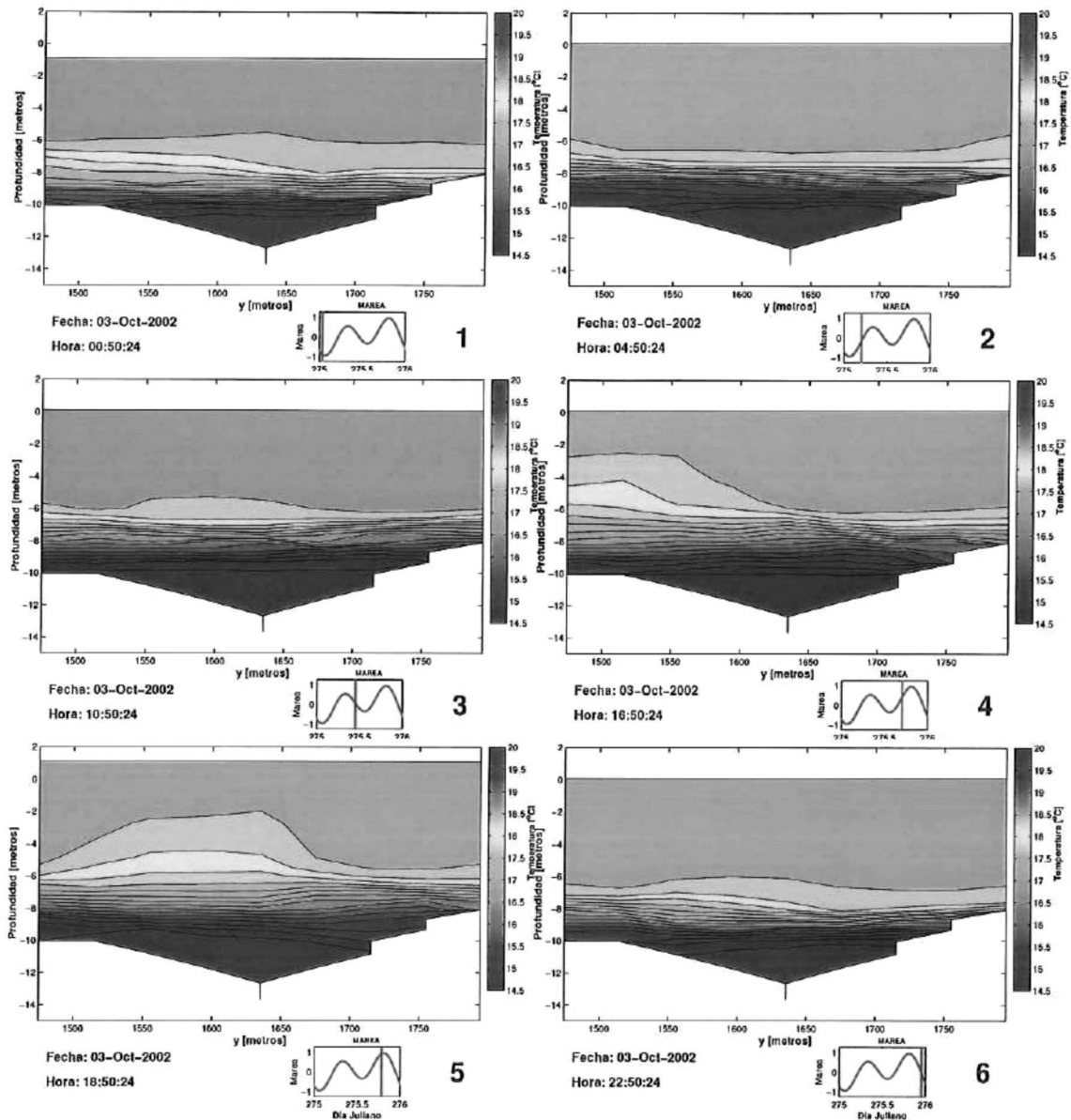


Sección 4 (Boca)



Vista horizontal de la batimetría del Puerto de Ensenada

Figura 3.4: Sección vertical 4: Distribución vertical de la temperatura entre las 08:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002. El rompeolas se encuentra a la izquierda y el espigón de el Gallo a la derecha de cada panel.



Sección 4 (Boca)

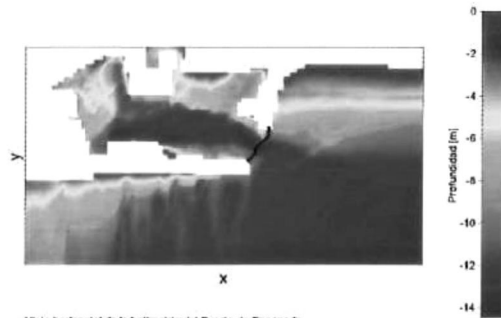
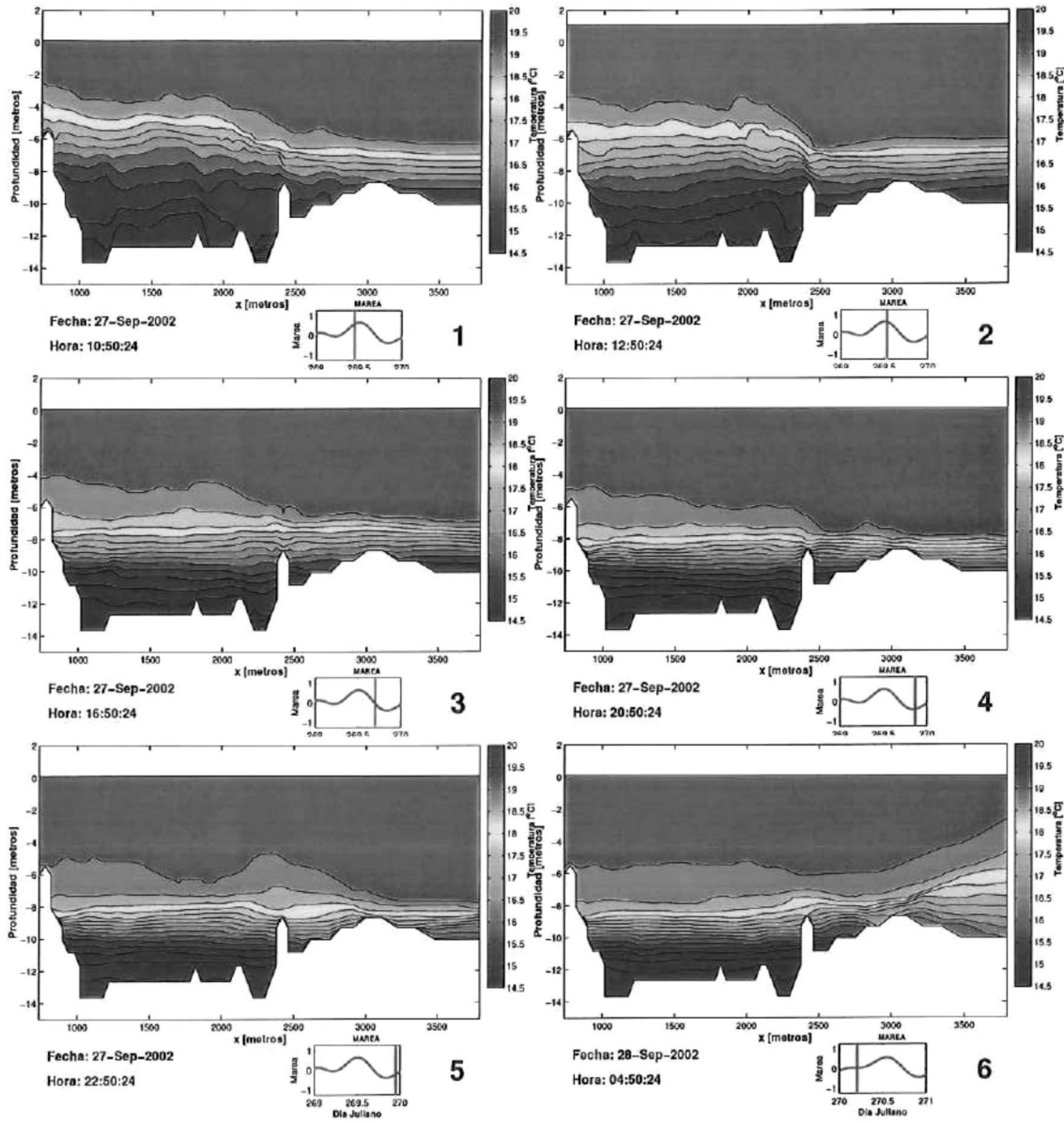
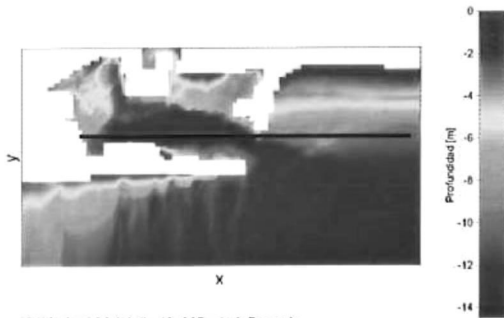


Figura 3.5: Sección vertical 4: Distribución vertical de la temperatura entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002. El rompeolas se encuentra a la izquierda y el espigón de el Gallo a la derecha de cada panel.

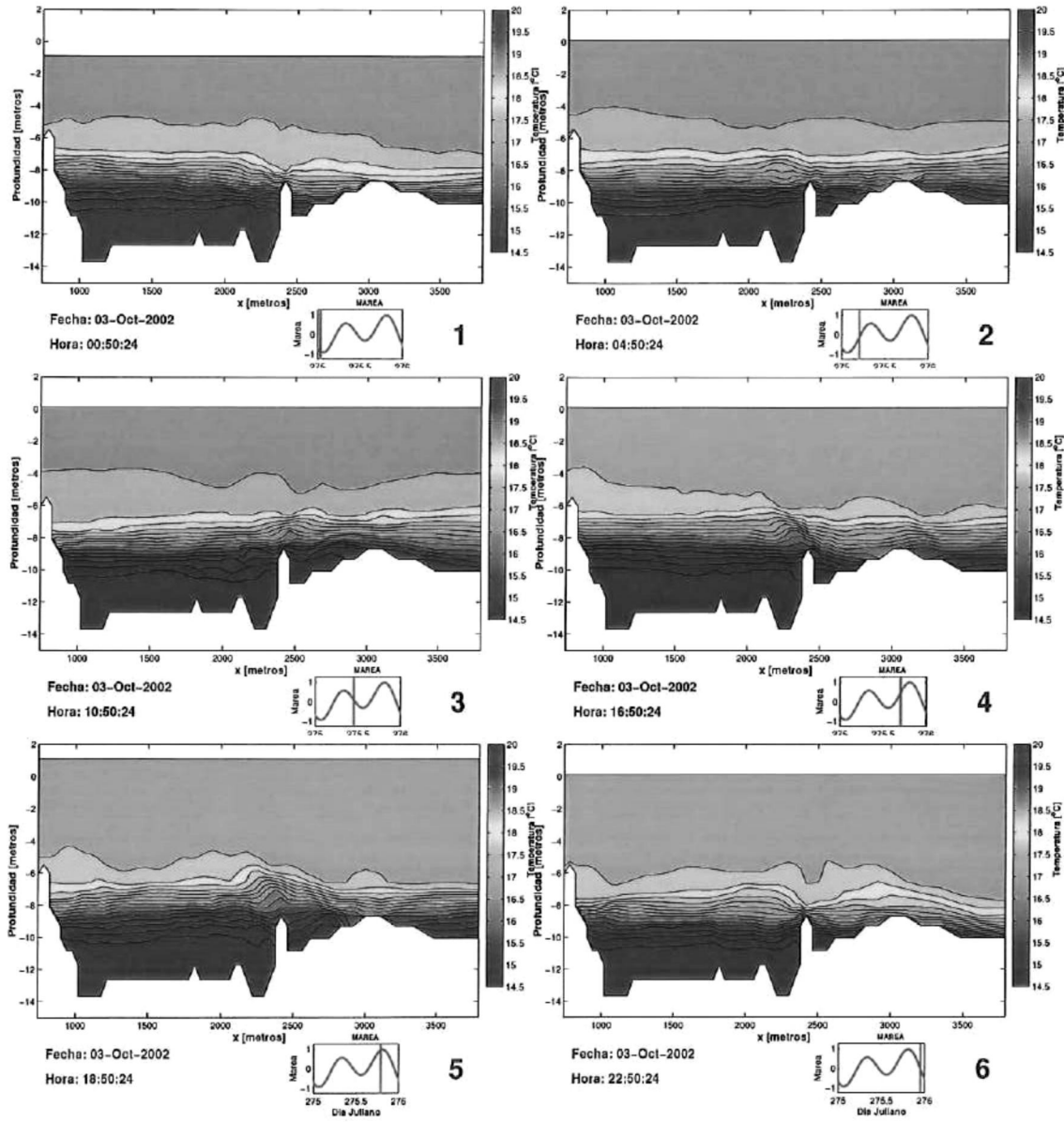


Sección 5 (Canal principal)

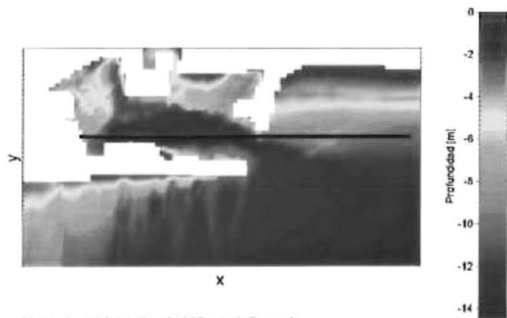


Vista horizontal de la batimetría del Puerto de Ensenada

Figura 3.6: Sección vertical 5: Distribución vertical de la temperatura entre las 10:50 27-Sep-2002 a las 04:50 27-Sep-2002. La zona norte del puerto se localiza a la izquierda de cada panel.



Sección 5 (Canal principal)



Vista horizontal de la batimetría del Puerto de Ensenada

Figura 3.7: Sección vertical 5: Distribución vertical de la temperatura entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002. La zona norte del puerto se localiza a la izquierda de cada panel.

3.1.2. Trazador 2

La figura 3.8 presenta el comportamiento de una descarga del SIBEO de 1000 l s^{-1} , mediante el trazador 2. El flujo del SIBEO fue detectable claramente después de dos horas de simulación (panel 2). El flujo se comportó como una intrusión correspondiente a la temperatura de la serie de tiempo asignada al SIBEO. En el panel 2 se percibió que la concentración del trazador 2 llegó al 12 %, pero disminuyó paulatinamente durante el pleamar, y se extendió una distancia de 300 m de la descarga de la bomba.

Examinado el comportamiento para el periodo de marea viva (Fig. 3.9) se observó que durante el pleamar existió una acumulación del flujo en la región cercana a la descarga, que durante el bajamar se distribuyó de manera uniforme. El efecto de la bomba fue notorio en la parte norte del puerto (panel 5), con excepción de la zona noreste.

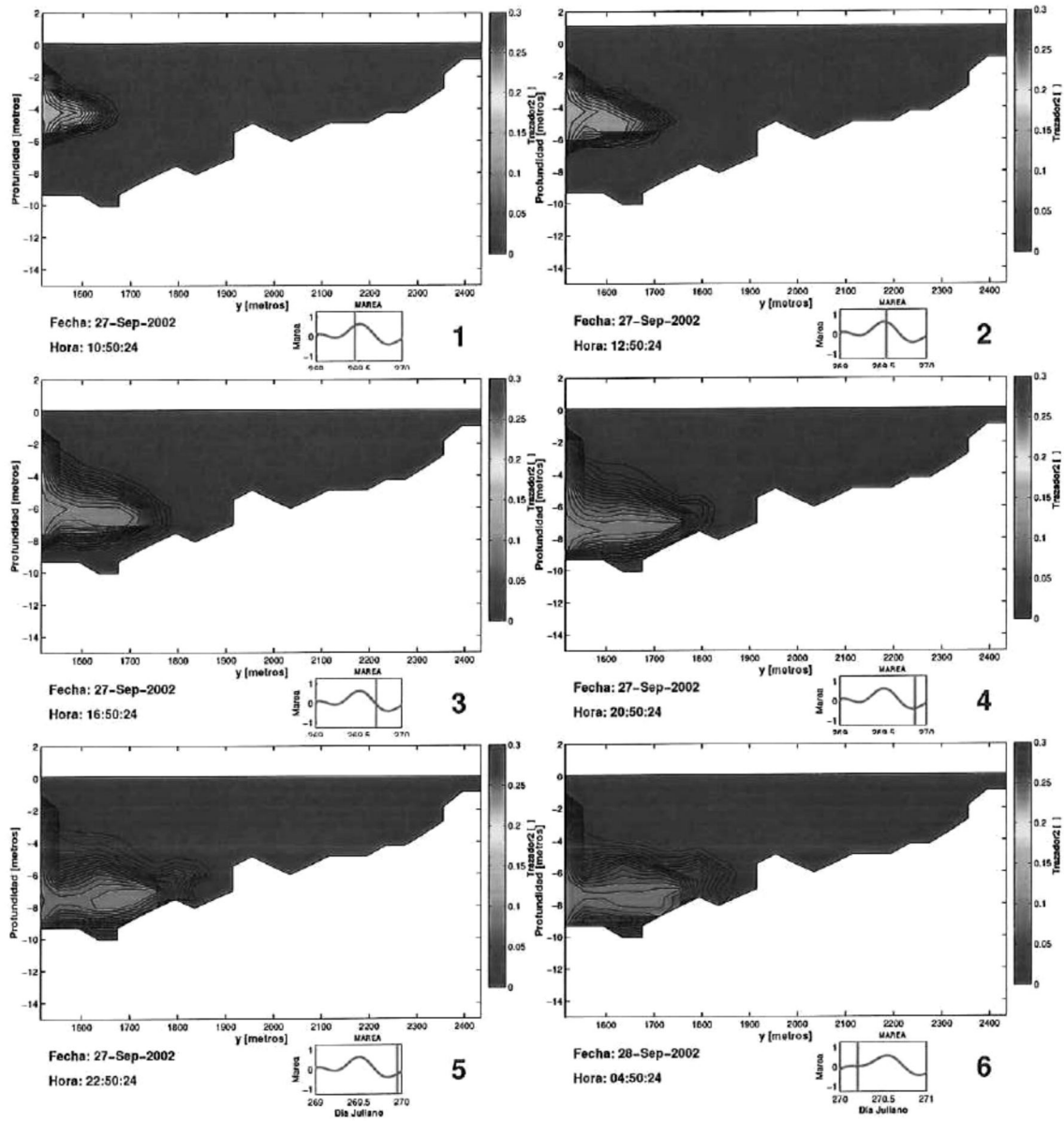
Aunque el efecto del SIBEO es poco perceptible en la boca (Fig. 3.10), examinando las figuras 3.11 y 3.12 fue posible apreciar que el flujo tuvo un importante proceso de advección que lo llevó a la boca y al exterior del puerto. Un detalle interesante es la boyancia del flujo fue suficiente para afectar significativamente la superficie, pero no para alcanzar profundidades mayores a los 9 m. Esto puede deberse a que el flujo descarga en la capa mezclada superficial.

Este trazador proporcionó evidencia del carácter no homogéneo en la vertical del flujo y refluo de marea. En el caso del flujo de marea viva (Fig. 3.12 panel 2), se observó que la marea transportó el trazador hasta los 3 m, y se desvió de manera oblicua hacia el interior del puerto en la zona cercana a la boca. Similarmente para el refluo, entre los paneles 5 y 6, se observó que el desplazamiento del agua al exterior del puerto fue entre 4 y 9 m de profundidad, y fue evidente una contracorriente superficial al interior del puerto.

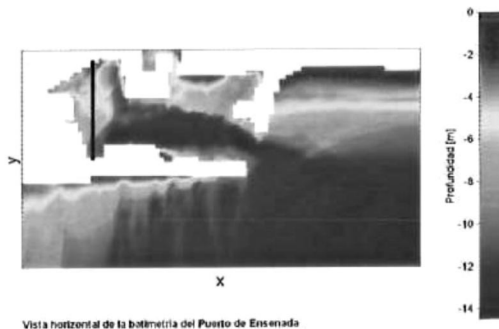
La configuración del afluente del SIBEO consideró que la toma de agua, en la zona expuesta del rompeolas, inyecta agua proveniente de una profundidad de 8 m y la descarga en superficie en la esquina noroeste del puerto. Las características de este flujo, de menor temperatura y ligeramente más salina, ocasionaron que su boyancia fuera insuficiente para permanecer en superficie. Como resultado, el flujo se hundió a una profundidad de 7 m. El experimento con trazadores confirmó este hallazgo, ya

que a lo largo de la simulación, el flujo del SIBEO fue rastreado desde la superficie hasta 7 m de profundidad. Esto implica que el efecto de saneamiento del puerto no se llevaría a cabo directamente sobre los sedimentos, sino promoviendo la evacuación del agua estancada en la zona norte del puerto. Este estancamiento, evaluado por medio de otro trazador, reveló que las corrientes generadas por la onda de marea no son suficientes para promover el transporte de trazadores o contaminantes hacia el exterior del puerto.

Otros estudios sobre descargas de agua sobre cuerpos costeros semicerrados (Ramírez e Imberger, 2002; Kolluru *et al.*, 2001) muestran que este tipo de flujos se comportan como plumas boyantes, verticalmente estratificadas, con un área relativamente grande y poco contacto con el fondo, conclusiones que concuerdan con los resultados obtenidos en este trabajo. Sin embargo la evaluación del transporte por medio de trazadores tiene dos limitantes importantes: (1) una vez que los trazadores son transportados através de la frontera abierta durante su concentración escalar se asigna en cero, por lo que hay una pérdida artificial de trazador en el sistema; y (2) se consideró que la concentración de trazador es comparable con algún tipo de contaminación no especificada, pero no se consideraron las descargas de “contaminante” cotidianas, tal y como ocurren en la realidad.

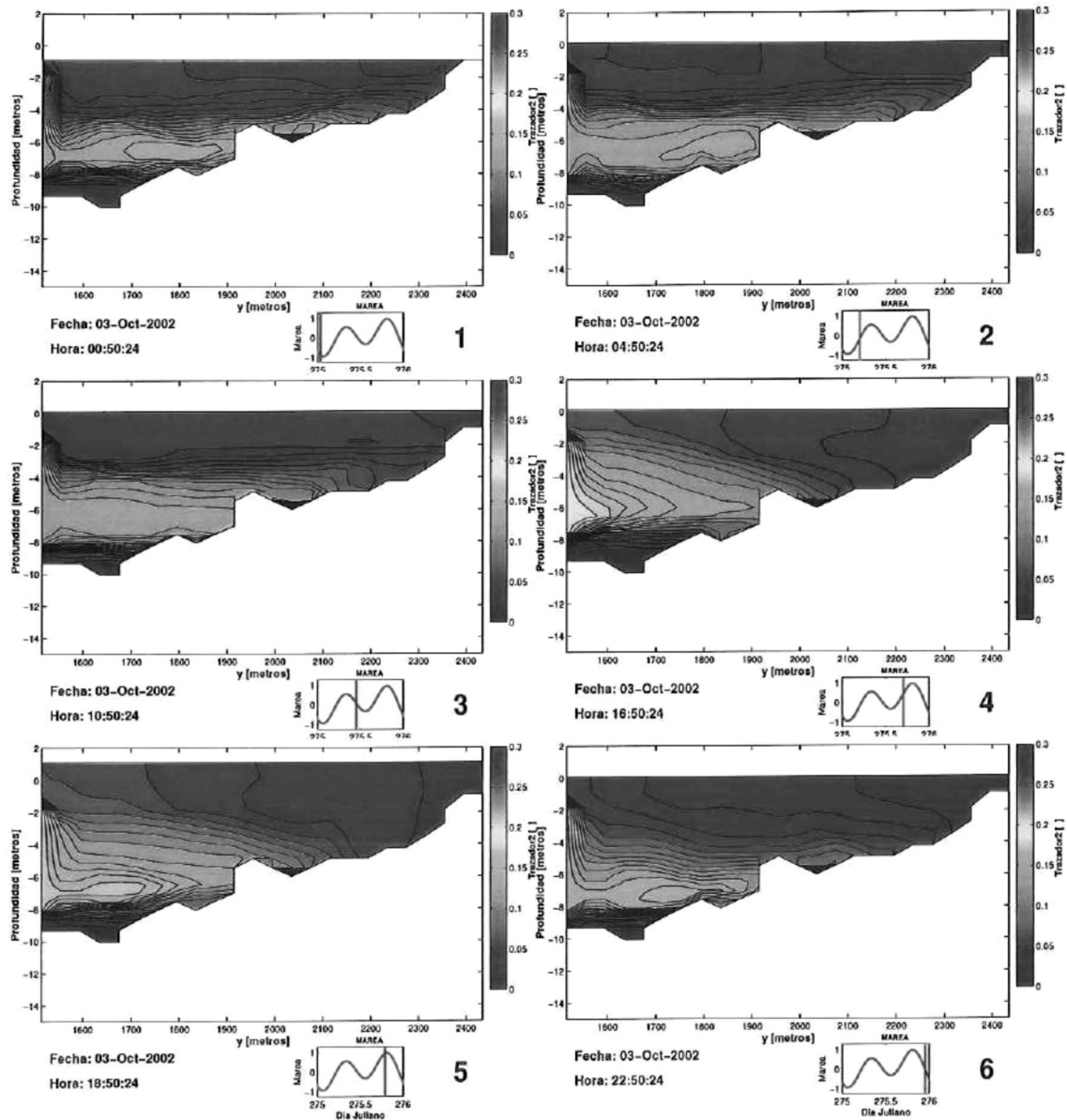


Sección 1 (SIBEO)



Vista horizontal de la batimetría del Puerto de Ensenada

Figura 3.8: Sección vertical 1: Distribución vertical del trazador 2 entre las 10:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002. La descarga del SIBEO está a la izquierda de cada panel.



Sección 1 (SIBEO)

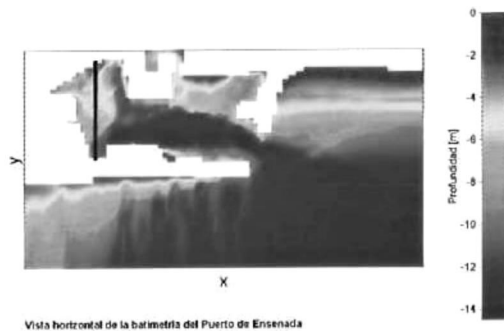
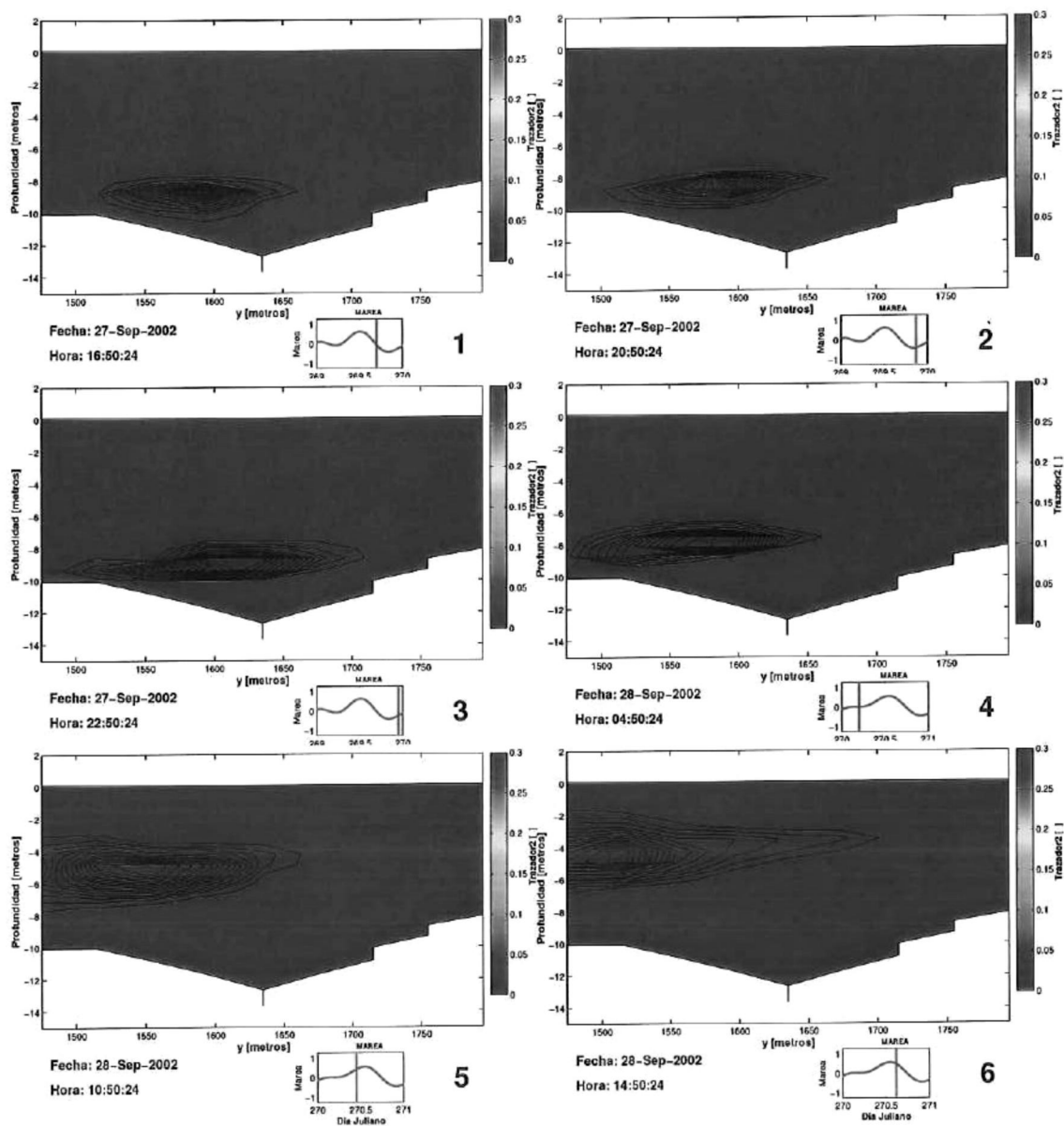


Figura 3.9: Sección vertical 1: Distribución vertical del trazador 2 entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002. La descarga del SIBEO está a la izquierda de cada panel.



Sección 4 (Boca)

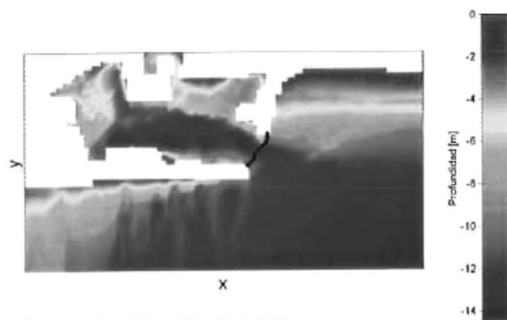
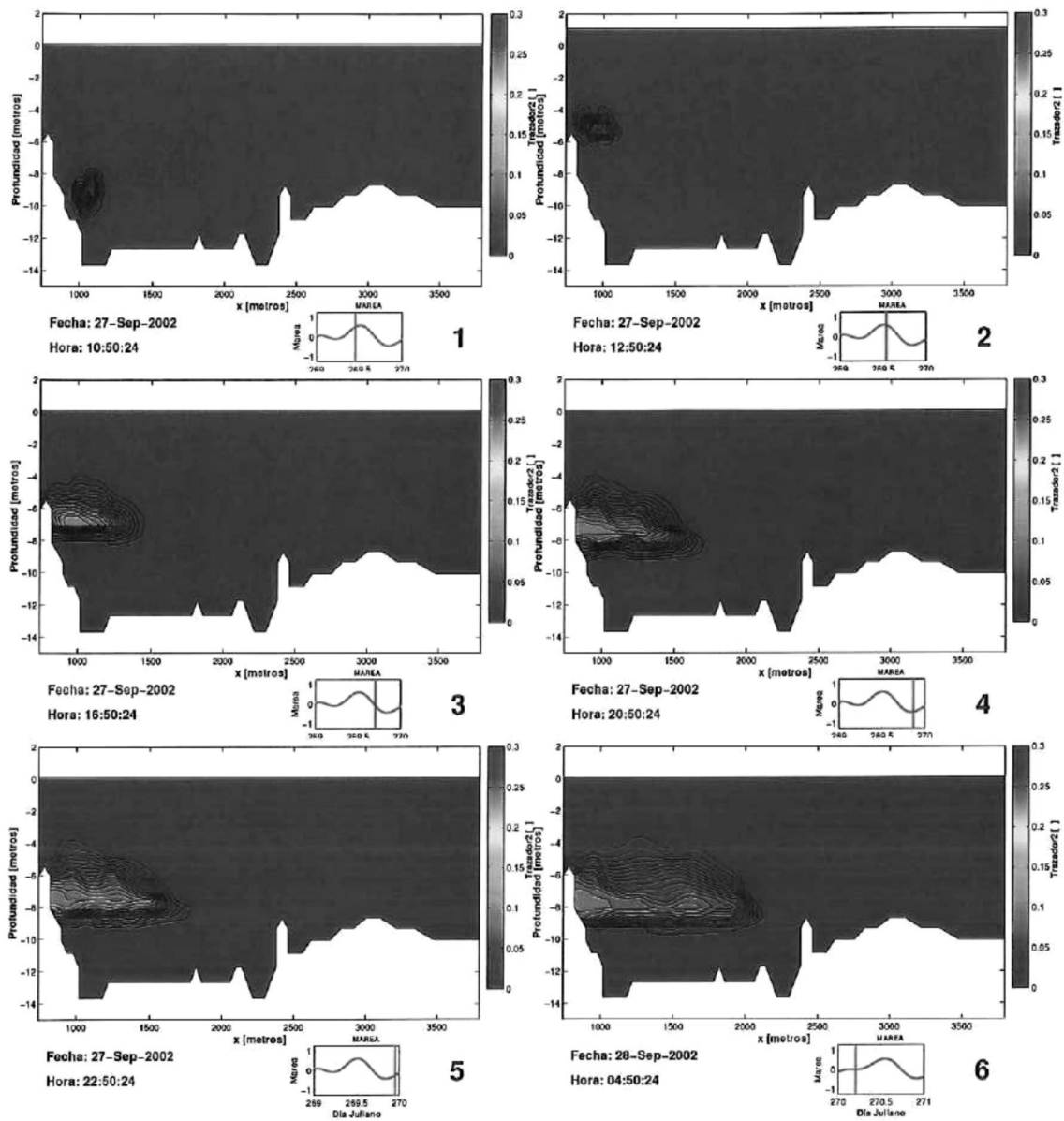
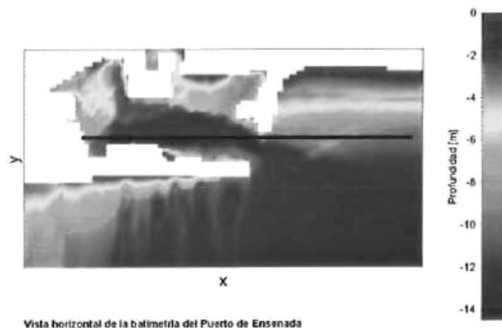


Figura 3.10: Sección vertical 4: Distribución vertical del trazador 2 entre las 16:50 27-Sep-2002 a las 16:50 28-Sep-2002. La descarga del SIBEO está a la izquierda de cada panel.

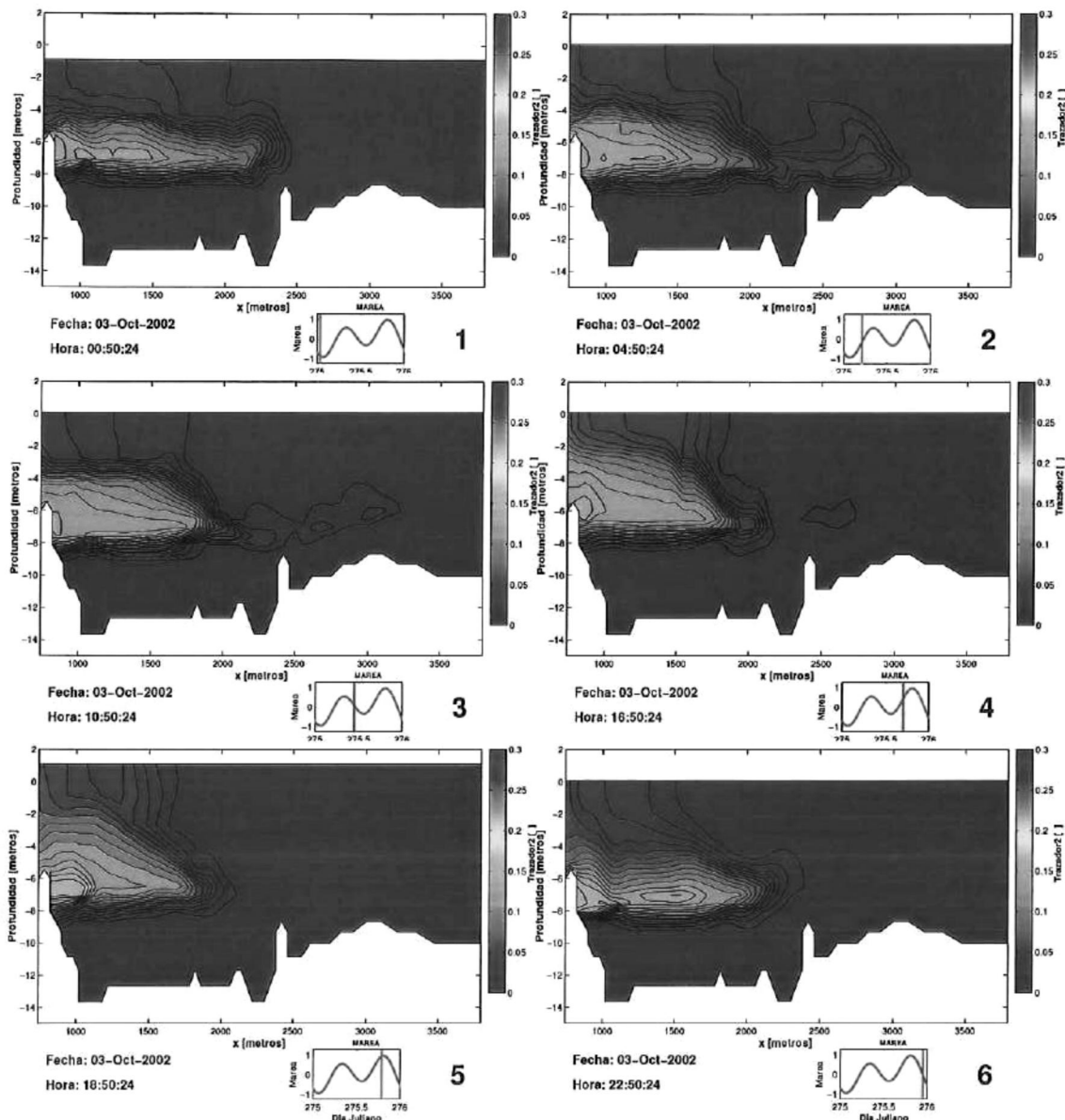


Sección 5 (Canal principal)

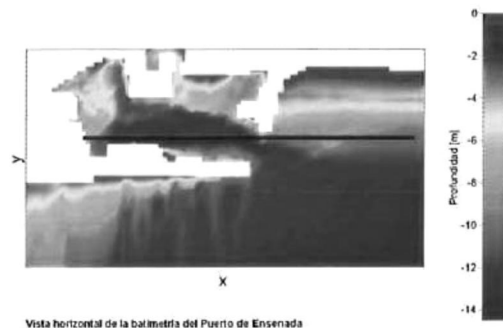


Vista horizontal de la batimetría del Puerto de Ensenada

Figura 3.11: Sección vertical 5: Distribución vertical del trazador 2 entre las 10:50 27-Sep-2002 a las 04:50 28-Sep-2002. La descarga del SIBEO está a la izquierda de cada panel.



Sección 5 (Canal principal)



Vista horizontal de la batimetría del Puerto de Ensenada

Figura 3.12: Sección vertical 5: Distribución vertical del trazador 2 entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 22:50 03-Oct-2002. La descarga del SIBEO está a la izquierda de cada panel.

3.2. Secciones horizontales

Las figuras 3.13 a 3.19 muestran los resultados generados por ELCOM para las siguientes secciones horizontales: superficie libre, capa 6 m de la superficie, y promedio en la columna de agua. Se presentan resultados del trazador 1, trazador 2 y velocidades horizontales. Cada panel contiene la velocidad en forma vectorial y sobrepuesto a éste, se presentan los contornos de rapidez ($\sqrt{u^2 + v^2}$), trazador 1 o trazador 2. Abajo de cada panel se muestran la fecha y hora, la marea, y la dirección y rapidez del viento.

3.2.1. Velocidades

La distribución de velocidades en la superficie libre se presenta en la figura 3.13. El esfuerzo del viento fue importante, en especial cuando la velocidad excedió los 7 m s^{-1} (panel 2 y 7), generando corrientes de 6 cm s^{-1} . El efecto del reflujó fue poco apreciable, mientras que el efecto del flujo fue notorio (panel 4 y 5). El campo de velocidad presentó ondulaciones en las zonas cercanas a la frontera abierta; estas ondulaciones pueden ser manifestaciones de inestabilidades locales del modelo o a un efecto de conservación de volumen, y se presentan como ondas numéricas.

El promedio en la vertical proporciona una idea general de los patrones de circulación en el puerto. La figura 3.14 muestra las corrientes durante marea muerta entre las 12:50 27-Sep-2002 y 14:50 28-Sep-2002. Al comienzo del primer bajamar de la simulación (panel 1) se observó un flujo al exterior del puerto por el centro del canal de acceso de 5 cm s^{-1} . Se apreciaron dos sistemas de remolinos anticiclónicos, uno al norte de la zona de cruceros y otro entre la terminal de pétreos y el muelle de SEMAR. Este remolino permaneció durante el pleamar, aunque con menor intensidad, mientras que el primero desapareció durante el bajamar.

Hubo dos periodos en los que las aguas estuvieron en reposo, a las 20:50 27-Sep-2002 y a las 04:50 28-Sep-2002, y coincidieron con en valle y la cresta de la onda de marea. Durante el pleamar se generaron remolinos pequeños en el rompeolas (panel 4) y en el espigón que no superaron los 3 cm s^{-1} .

El patrón de circulación durante un ciclo de mareas vivas se muestra en la figura 3.15. A las 00:50 03-Oct-2002 las corrientes fueron mínimas, con un reflujó limitado al canal de acceso. A las 04:50 (panel 2) el pleamar provocó un importante flujo que

ocupó toda la extensión del canal de acceso. Este flujo afectó la zona de los muelles de SEMAR con velocidades entre 4 cm s^{-1} y 7 cm s^{-1} en la boca, del lado del espigón. Parte de este flujo se desvió a la izquierda y penetró al canal de acceso de la Marina Baja Internacional (MBI), con una corriente de 3 cm s^{-1} . La otra parte se desvió a la derecha y provocó un remolino pequeño cerca del muelle de Cementos. Sobre la dársena de ciaboga, entre la zona de contenedores y cruceros, el flujo se alineó a la dirección del canal principal y fue homogéneo en dirección norte. Toda la región norte del puerto presentó velocidades bajas, menores de 1 cm s^{-1} .

A las 10:50 del 03-Oct-2002 (panel 3) durante el bajamar, ocurrió un reflujo con velocidades de 4 cm s^{-1} , con mayor intensidad en los extremos de la boca. La corriente en la dársena de ciaboga tuvo dirección a la boca, con velocidades bajas (2 cm s^{-1}), mientras que la zona norte del puerto se mantiene casi sin movimiento. Durante el siguiente pleamar (panel 4), las velocidades del flujo en la boca se incrementaron a 6 cm s^{-1} , y se formó un remolino que ocupó la totalidad de la zona sureste del puerto. El flujo en el canal de acceso a la marina de MBI es comparable con el ocurrido durante el pleamar de las 04:50. Durante la cresta de este pleamar (panel 5) se aprecia la formación de un remolino importante en la boca de acceso con velocidades de 6 cm s^{-1} , seguido de un bajamar pronunciado (panel 6). Czitrom-Bauss *et al.* (2002), aplicando un modelo bidimensional similar a HAMSOM, encontraron evidencia de los remolinos antes mencionados, a excepción del que se formó en la boca. Se cree que estos remolinos tienen un papel importante en el transporte de contaminantes y basura en y desde el puerto, por lo que serán objeto de un estudio posterior más detallado.

El reflujo alcanzó velocidades máximas, de 7 cm s^{-1} en la boca. El efecto de este pleamar se percibió en la zona norte del puerto, donde el flujo se alineó en dirección sur, girando al sureste sobre la dársena de ciaboga y posteriormente hacia el sur, el exterior del puerto. Cuatro horas después (panel 7) las corrientes volvieron a ser mínimas, con un ligero flujo, con mayores velocidades en los extremos de la boca de acceso, entre el rompeolas y el espigón.

Las velocidades encontradas se asemejan a los resultados de estudios observacionales en la zona de la bahía cercana al puerto, ya que Álvarez-Sánchez *et al.* (1988) encontraron en el periodo entre septiembre y enero velocidades de 5 cm s^{-1} ,

mientras que en este trabajo se encontraron velocidades máximas de 7 cm s^{-1} . Estas similitudes proveen evidencia de que el modelo es capaz de reproducir las condiciones dinámicas del Puerto de Ensenada.

En términos de la capacidad de la estación de monitoreo, se puede observar que el modelo reproduce muy bien las condiciones de flujo en la zona de monitoreo.

En conclusión, el modelo de flujo de agua en el Puerto de Ensenada reproduce muy bien las condiciones de flujo en la zona de monitoreo, lo que permite evaluar el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente acuático.

En términos de la capacidad de la estación de monitoreo, se puede observar que el modelo reproduce muy bien las condiciones de flujo en la zona de monitoreo, lo que permite evaluar el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente acuático.

En conclusión, el modelo de flujo de agua en el Puerto de Ensenada reproduce muy bien las condiciones de flujo en la zona de monitoreo, lo que permite evaluar el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente acuático.

En conclusión, el modelo de flujo de agua en el Puerto de Ensenada reproduce muy bien las condiciones de flujo en la zona de monitoreo, lo que permite evaluar el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente acuático.

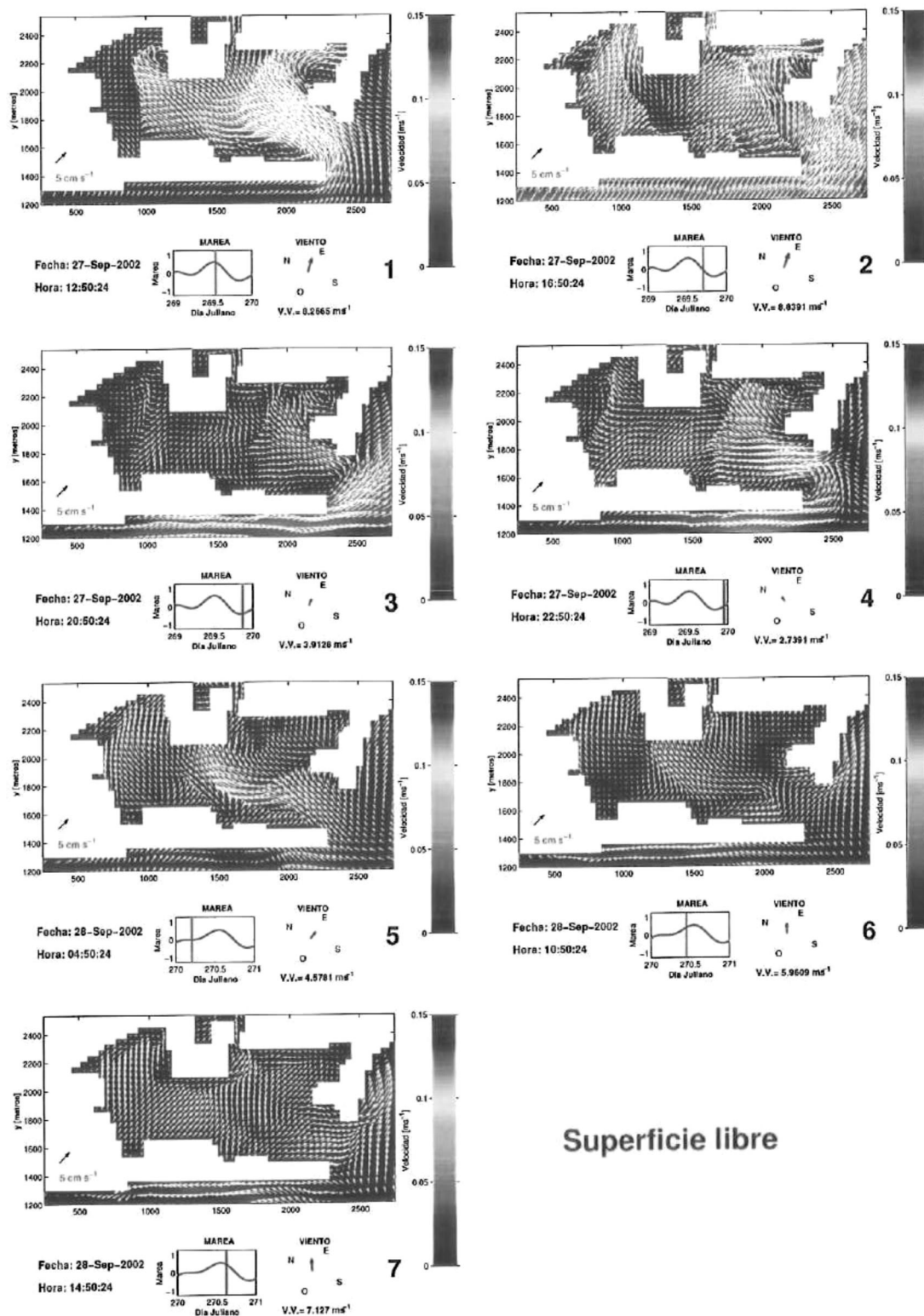


Figura 3.13: Superficie libre: Velocidades y distribución horizontal de la rapidez entre las 12:50 27-Sep-2002 a las 14:50 28-Sep-2002

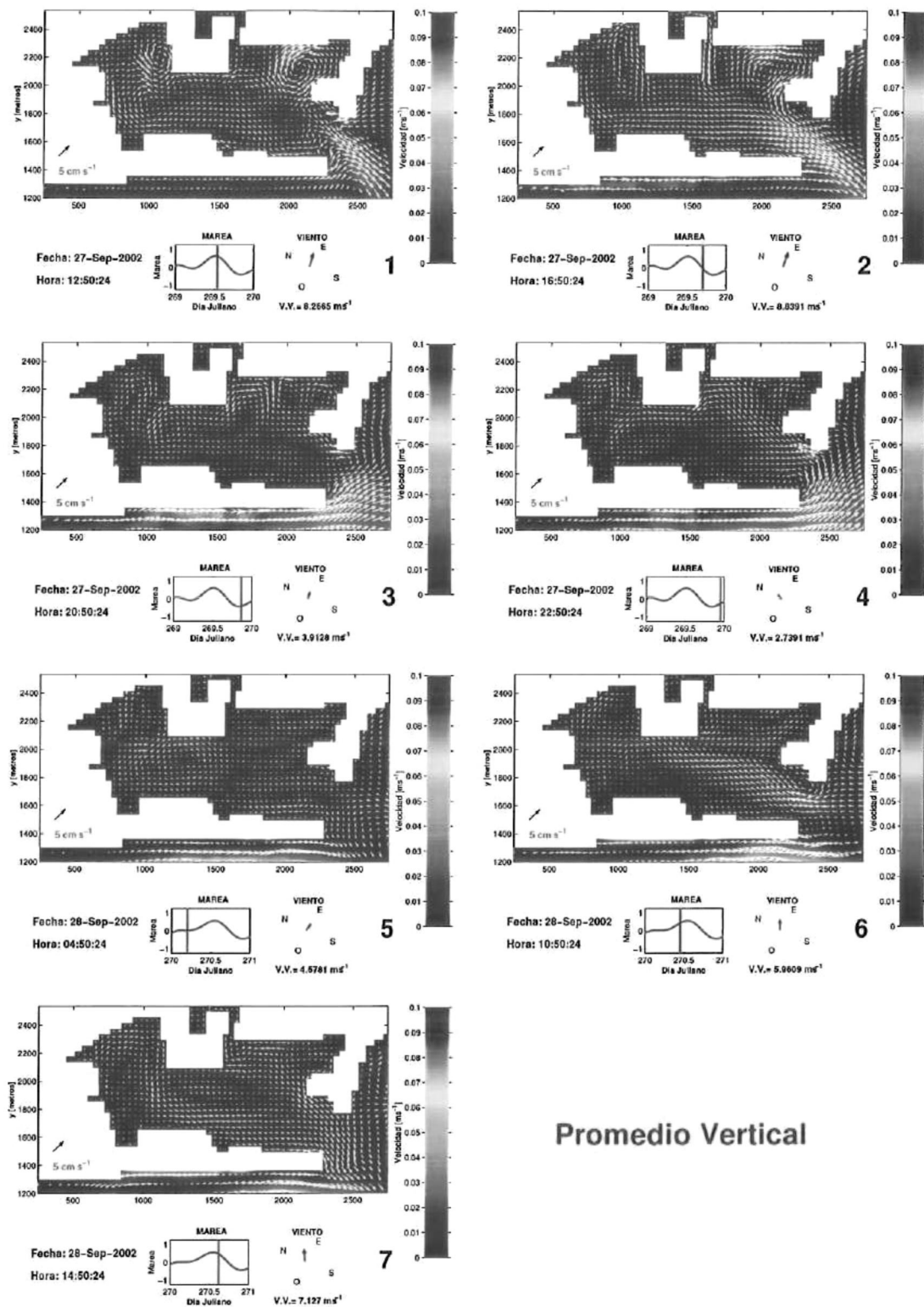
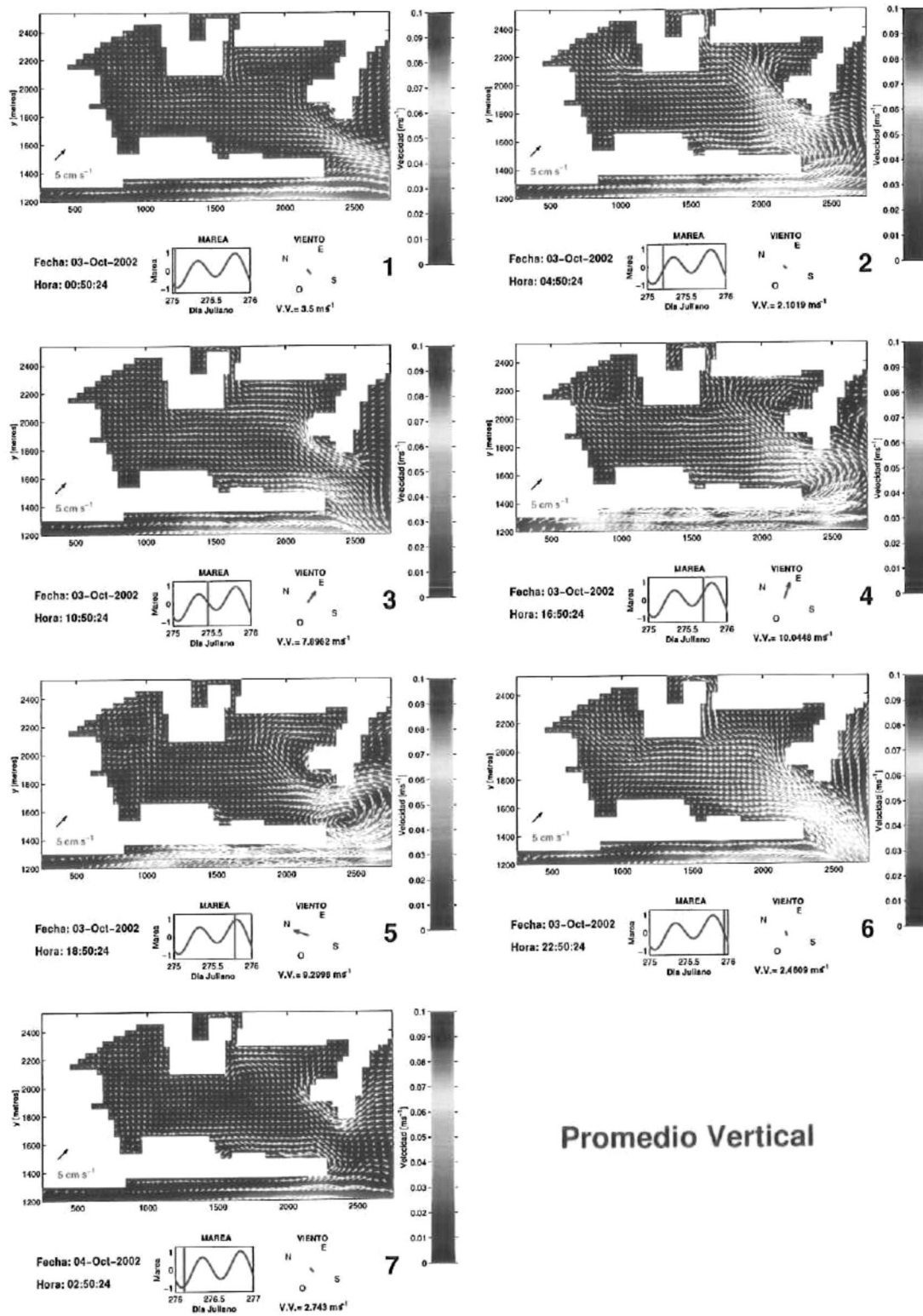


Figura 3.14: Promedio vertical: Velocidades y distribución horizontal de la rapidez entre las 12:50 27-Sep-2002 a las 14:50 28-Sep-2002.



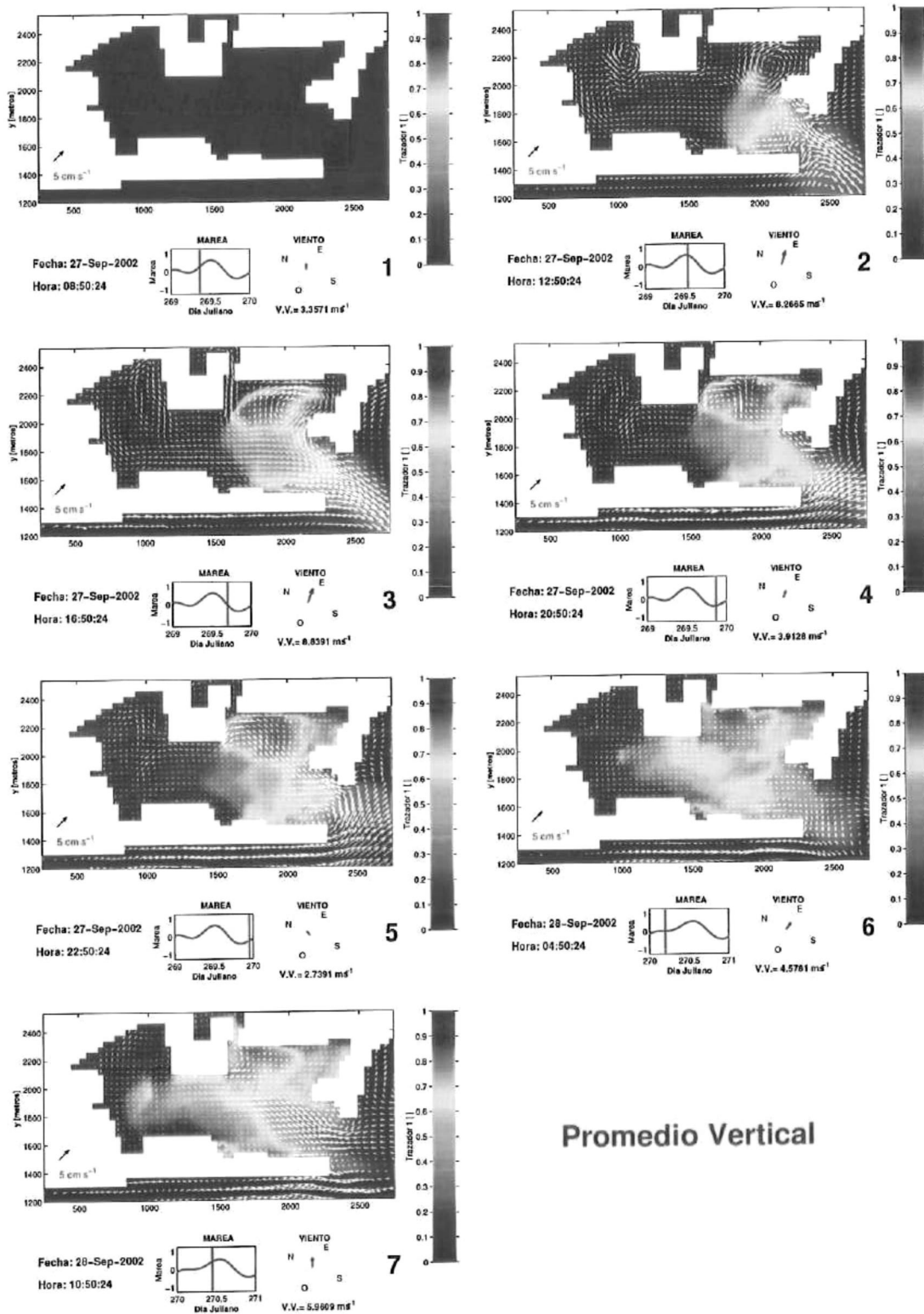
Promedio Vertical

Figura 3.15: Promedio vertical: Velocidades y distribución horizontal de la rapidez entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 02:50 04-Oct-2002.

3.2.2. Trazador 1

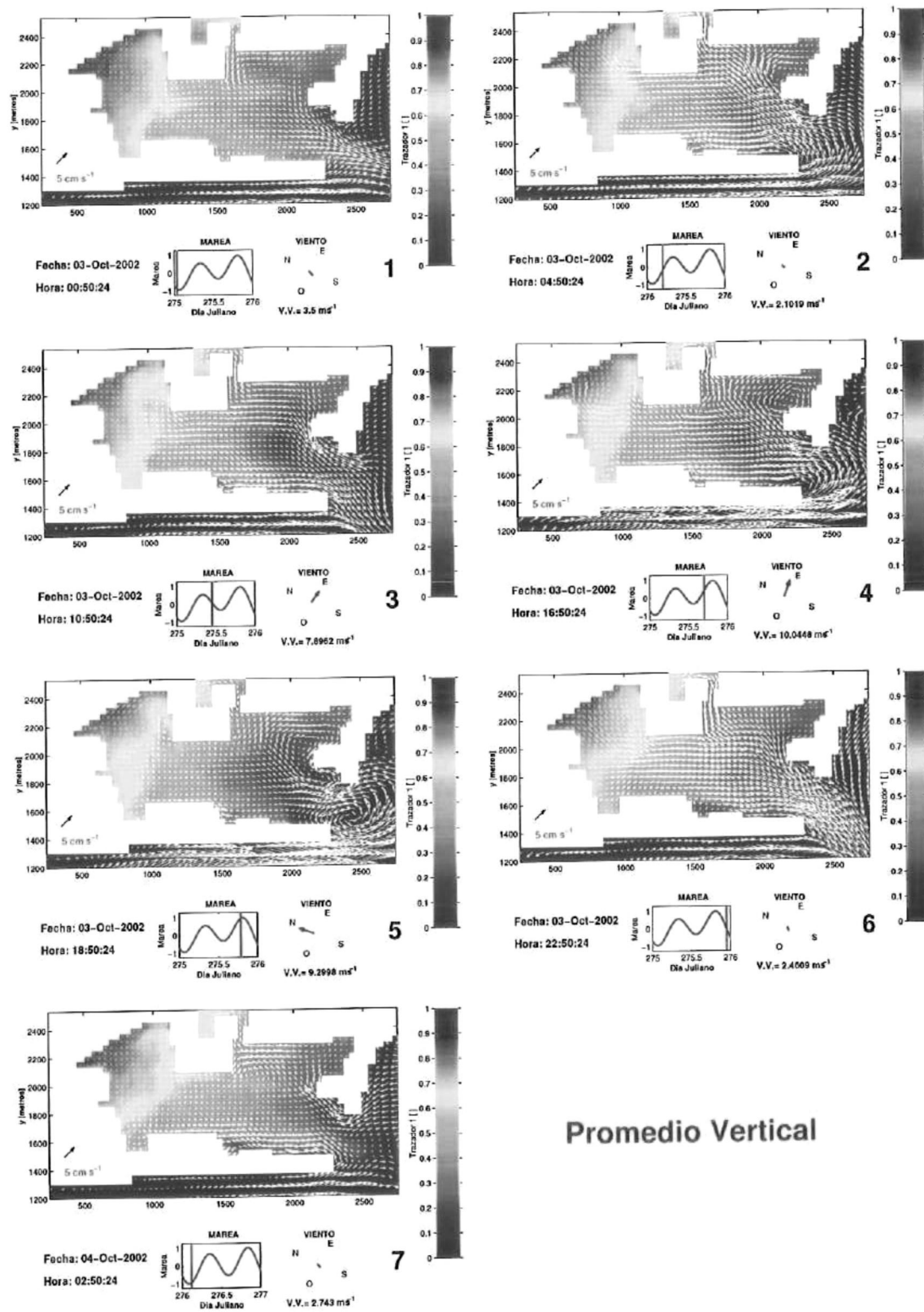
El comportamiento del trazador 1 se muestra en las figuras 3.16 (marea muerta) y 3.17 (marea viva). Se presenta el promedio para la columna de agua, describiendo el patrón general de evacuación del trazador 1. Cuatro horas después de que inició la simulación (Fig. 3.16, panel 1), el efecto de la marea se manifestó sólo en la zona cercana a la boca, pero durante el bajamar (panel 2) el efecto fue importante en la zona del muelle de SEMAR y en el canal de entrada de MBI. Esto revela una intrusión de agua del exterior del puerto, aun en bajamar. La localización de la zona en la que esta intrusión emergió a superficie se puede explicar con la forma de la batimetría, que en esta zona tiene un someramiento notable (Fig. 2.2, p. 15). A las 14:50 hrs. del 28-Sep-2002 (panel 7) la zona influenciada por la marea comprendió el canal de acceso el muelle de cruceros, parte de la dársena de ciaboga y el canal de acceso de la marina de MBI. El efecto de marea no fue apreciable en la esquina sureste del puerto, en el interior de MBI o en la sección norte del puerto.

Después de 5 días de simulación (Fig. 3.17) el trazador fue evacuado de la sección sur del puerto y el canal de acceso, pero todavía existió una concentración apreciable en la marina MBI y en toda la zona noreste del puerto. Después de un ciclo de marea viva (panel 7), el trazador remanente en MBI fue diluido al 50 % de su concentración original, mientras que en la zona noreste permaneció con la concentración inicial. Este resultado provee evidencia de que el prisma de marea no es mezclado completamente en el interior del puerto (Fischer *et al.*, 1979) por lo que la contribución de las mareas en el tiempo de residencia es relativamente modesta.



Promedio Vertical

Figura 3.16: Promedio en la vertical: Distribución horizontal del trazador 1 entre las 12:50 27-Sep-2002 y las 14:50 28-Sep-2002.



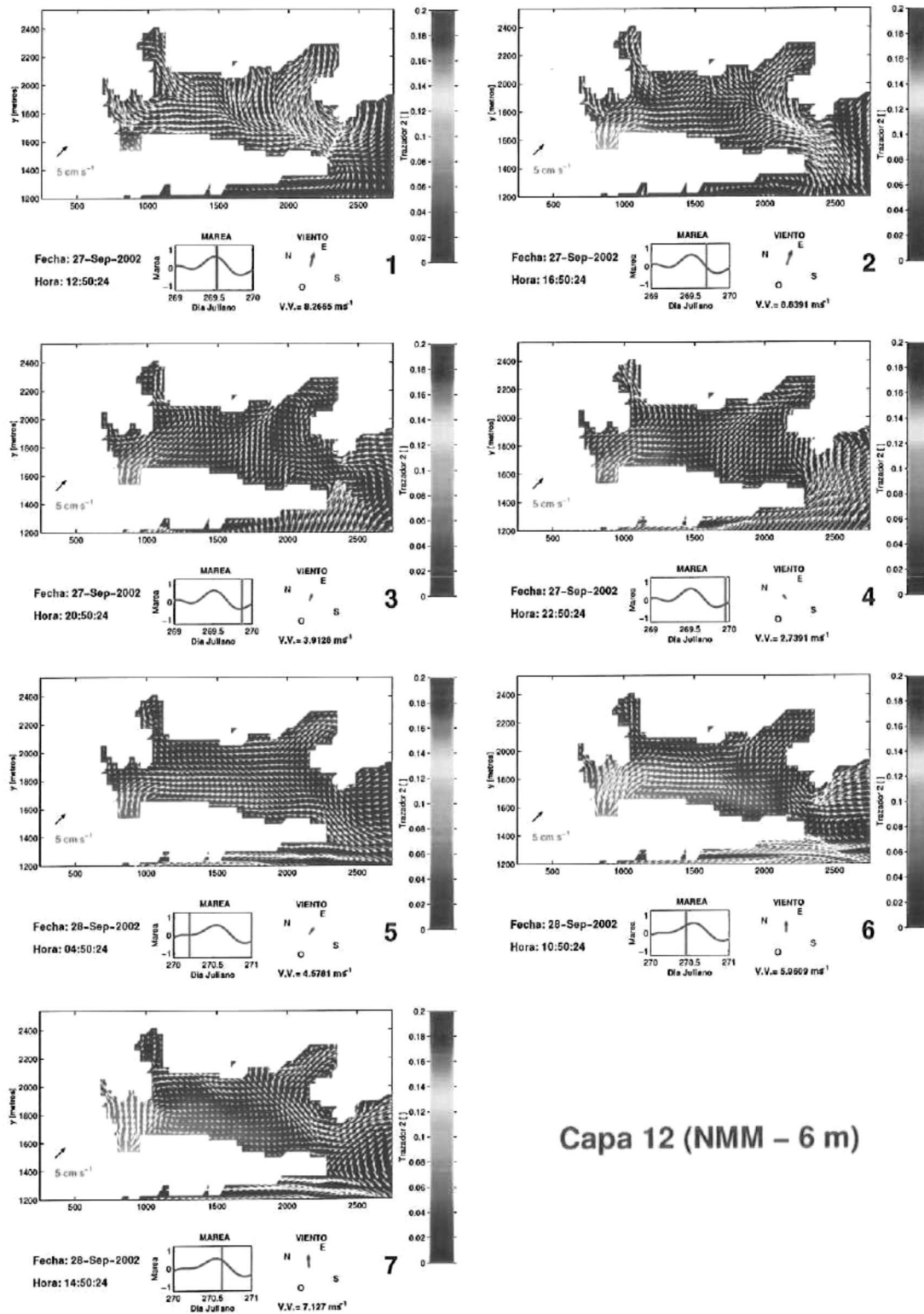
Promedio Vertical

Figura 3.17: Promedio en la vertical: Distribución horizontal del trazador 1 entre las 00:50 03-Oct-2002 y las 02:50 04-Oct-2002.

3.2.3. Trazador 2

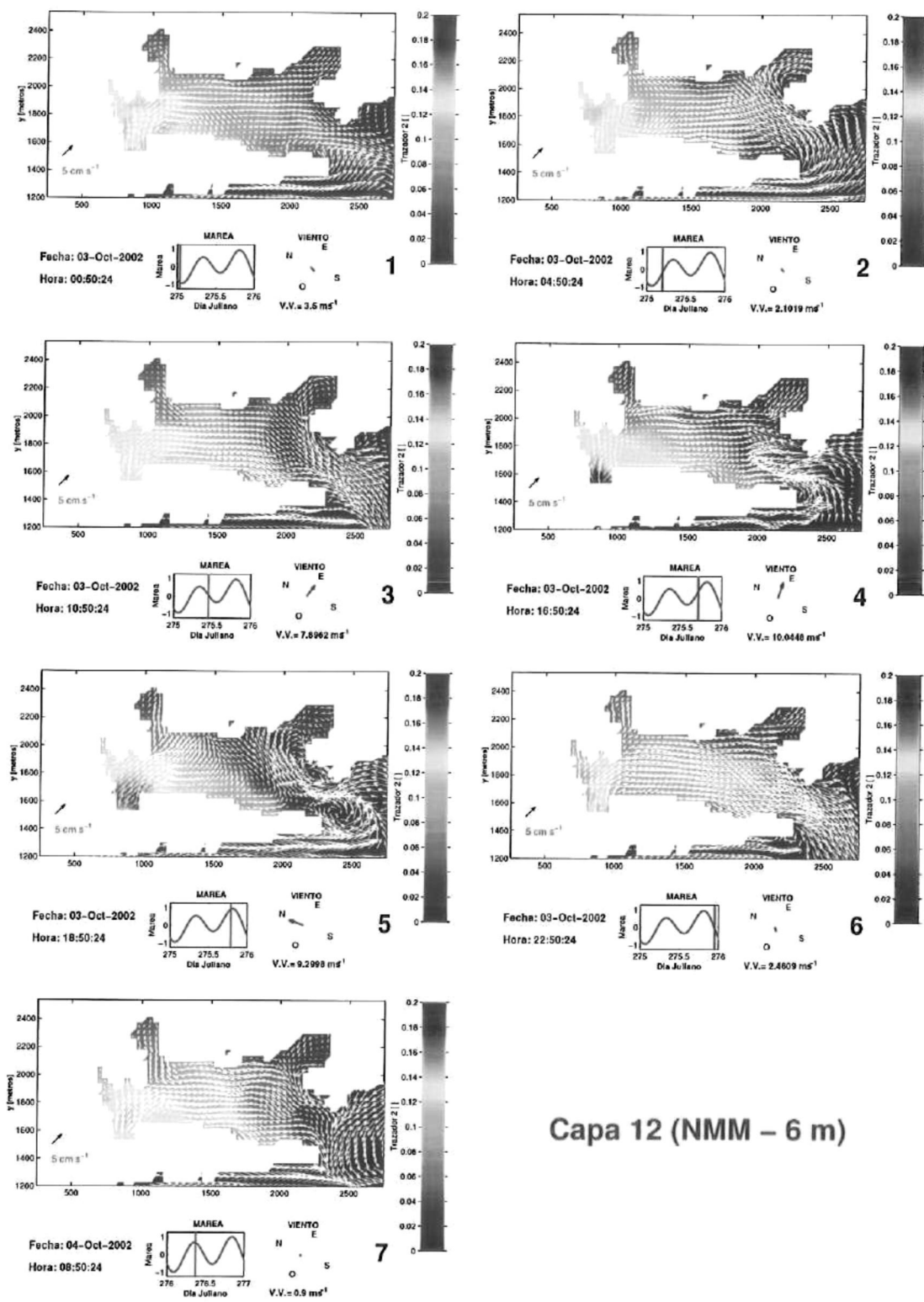
El comportamiento de la descarga del SIBEO para la capa situada entre 6 y 7 m de profundidad se muestra mediante el trazador 2 en la figura 3.18. Aun esta capa no es en la que se efectúa la descarga, se observó que el efecto de la intrusión de agua del SIBEO fue más importante entre los 6 y 7 m de profundidad. Al inicio de la simulación (panel 1) la concentración de trazador fue apenas perceptible en la zona de la descarga del SIBEO. Dos horas después (panel 6) el efecto fue perceptible en una franja sobre el canal principal del lado de la zona de contenedores, con una dirección de transporte en dirección a la boca.

La distribución del trazador cinco días después se muestra en la figura 3.19. Se observó una acumulación de trazador en la zona cercana a la descarga del SIBEO, que posteriormente se extendió hasta la zona de cruceros (panel 7). Existieron zonas en las que no se detectaron cantidades apreciables de trazador, como las esquinas noreste y la sureste del puerto. En el primer caso esto se puede deber a que la forma de la batimetría representa un obstáculo para el transporte de trazador a esa zona. En el segundo, la dirección de la corriente sobre el canal principal provoca que el trazador sea transportado hacia el exterior del puerto.



Capa 12 (NMM - 6 m)

Figura 3.18: Capa 12: Distribución horizontal del trazador 2 entre las 12:50 27-Oct-2002 a las 14:50 28-Sep-2002.



Capa 12 (NMM - 6 m)

Figura 3.19: Capa 12: Distribución horizontal del trazador 2 entre las 00:50 03-Oct-2002 a las 08:50 04-Oct-2002.

3.3. Validación

Las figuras 3.20 a la 3.25 comparan los datos de temperatura obtenidos en la campaña de campo descrita en la sección 2.2.2 con resultados simulados con ELCOM para los mismos puntos del Puerto de Ensenada. Se utilizaron únicamente datos de temperatura, por ser estos los que mostraron patrones más definidos. Se encontró que la variación vertical de la salinidad es reducida, por lo que se puede considerar que la estratificación observada es función únicamente de la variación vertical de la temperatura.

El panel superior de cada figura presenta la evolución en tiempo de la estructura vertical de la temperatura en un punto. El eje vertical es profundidad en metros, mientras que el eje horizontal es tiempo en horas. Las líneas verticales negras indican el instante en el que se hizo el lance de CTD mientras que el mapa de contornos muestra la distribución de la temperatura. El panel inferior presenta los resultados que generó el modelo durante el mismo periodo de tiempo. El panel superior derecho muestra la marea y el periodo muestreado entre líneas rojas; el panel inferior derecho muestra la localización del lance de CTD.

La figura 3.20 muestra los datos obtenidos en la estación A, en la boca de acceso al puerto, adyacente al rompeolas. Los datos de campo mostraron una capa mezclada superficial sobre una termoclina pronunciada a 9 m. Entre las 11:00 y 12:00 hrs. se presentó un calentamiento de la superficie, alcanzando los 20 °C. A las 12:00 hrs, la termoclina se debilitó y la isoterma de los 19.5 °C ascendió de 6 m a 1 m de profundidad. Al final de la serie de datos la termoclina mostró una tendencia a fortalecerse, aunque la isoterma de los 19.5 °C permaneció cercana a la superficie. Los datos del modelo mostraron similitud con los datos de campo, en particular el debilitamiento de la termoclina alrededor de las 11:30 hrs. y el comportamiento de las isotermas de 18 y 18.5 °C ocurrido alrededor de las 15:30 hrs. La simulación no reprodujo el abrupto someramiento de la termoclina de los 19.5 °C registrado entre las 14:00 y las 15:00 hrs, ni el calentamiento de la superficie a las 12:00 hrs, ya que se debe considerar que la mañana del día del muestreo la cobertura de nubes fue total y se despejó alrededor de las 11:00 hrs. Este calentamiento superficial podría explicar la discrepancia entre los datos de campo y el modelo.

Los datos para la estación B (Fig. 3.21) presentaron un escenario parecido a los de

la estación A. El modelo fue capaz de reproducir el debilitamiento de la termoclina registrado alrededor de las 12:00 hrs. Los resultados del modelo para la estación C (Fig. 3.22) reprodujeron las ondulaciones de las isotermas y el estado de la estratificación al final del muestreo, aunque debe considerarse que la condición inicial en esta estación fue diferente a las mediciones de campo.

Los resultados más disímiles entre las observaciones y el modelo se registraron en la estación D (Fig. 3.23). Los datos de campo mostraron un someramiento abrupto de la isoterma de los 19.5 °C seguido por un ligero hundimiento los 2 m de profundidad, con una condición estable durante varias horas. En cambio, el modelo presentó una estratificación estable, con pocas ondulaciones en las isotermas. Esto revela la necesidad de mejoras en el esquema de cerradura ya que la energía turbulenta generada por la marea es insuficiente para mantener la mezcla contra el flujo de boyancia superficial, causado por la radiación solar (Fischer *et al.*, 1979; Young *et al.*, 2001).

Los resultados fueron satisfactorios en la estación E (Fig. 3.24). Los datos de campo mostraron un hundimiento generalizado de las isotermas, que el modelo reprojuo de manera satisfactoria. También logró reproducir el calentamiento superficial que muestran los datos de campo, aunque en el modelo el calentamiento comenzó una hora antes. Es notoria la diferencia que se registró en la profundidad de la isoterma de 19.5 °C, a 4.5 m en los datos de campo, mientras que el modelo la situó a 2 m de profundidad.

Por último, la figura 3.25 compara los datos de temperatura y los resultados del modelo en la zona norte del puerto. ELCOM reprodujo bien el hundimiento generalizado de las isotermas menores a los 19 °C, presentando un escenario homogéneo el final del día. El modelo no mostró indicios de calentamiento superficial y esto debe atribuirse al carácter teórico de los datos de radiación solar proporcionados.

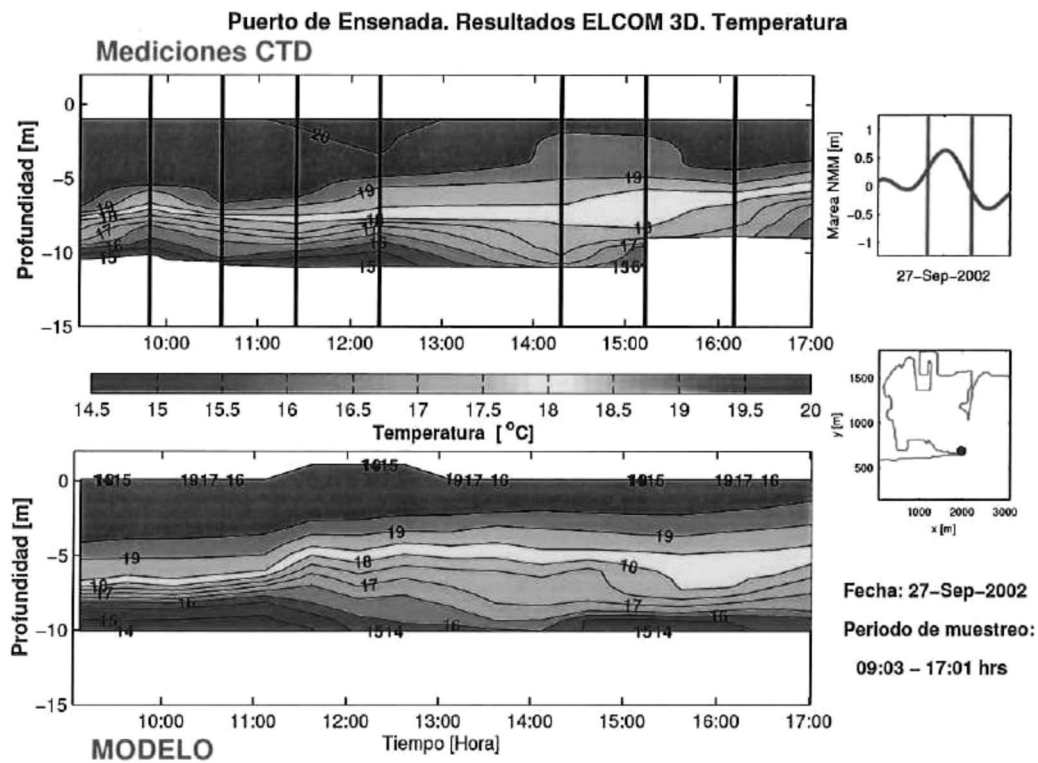


Figura 3.20: Serie de tiempo de temperatura para la estación A, comparada con resultados del modelo, entre las 09:03 y las 17:01 del 27-Sep-2002

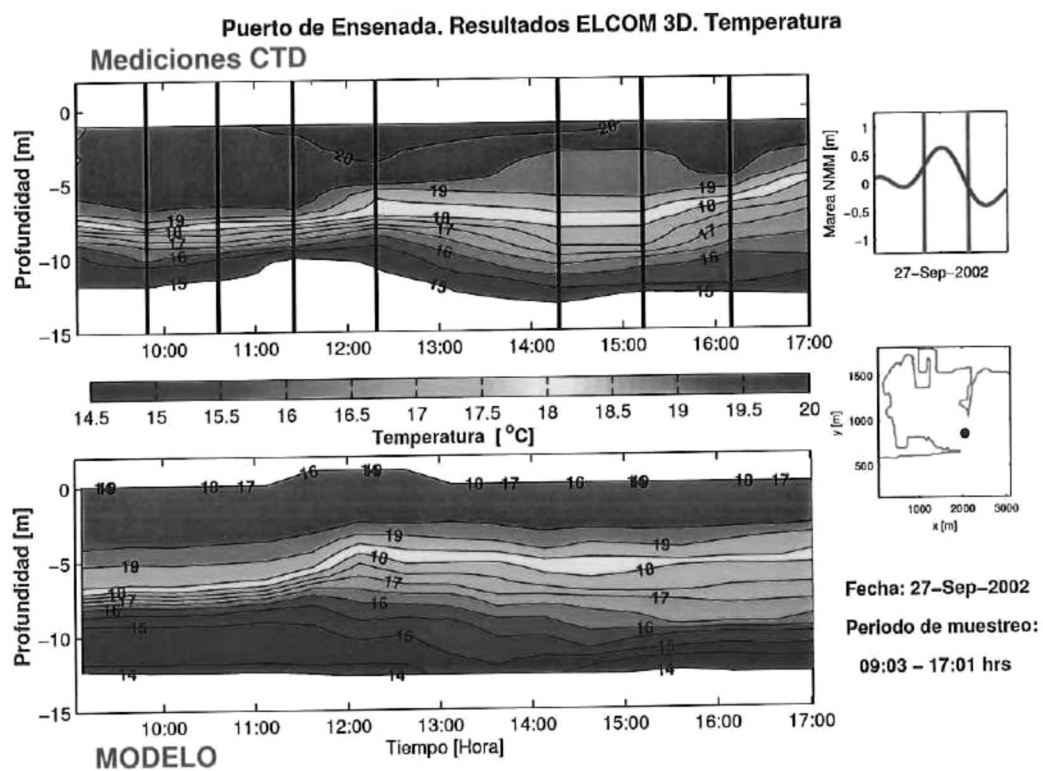


Figura 3.21: Serie de tiempo de temperatura para la estación B, comparada con resultados del modelo, entre las 09:03 y las 17:01 del 27-Sep-2002

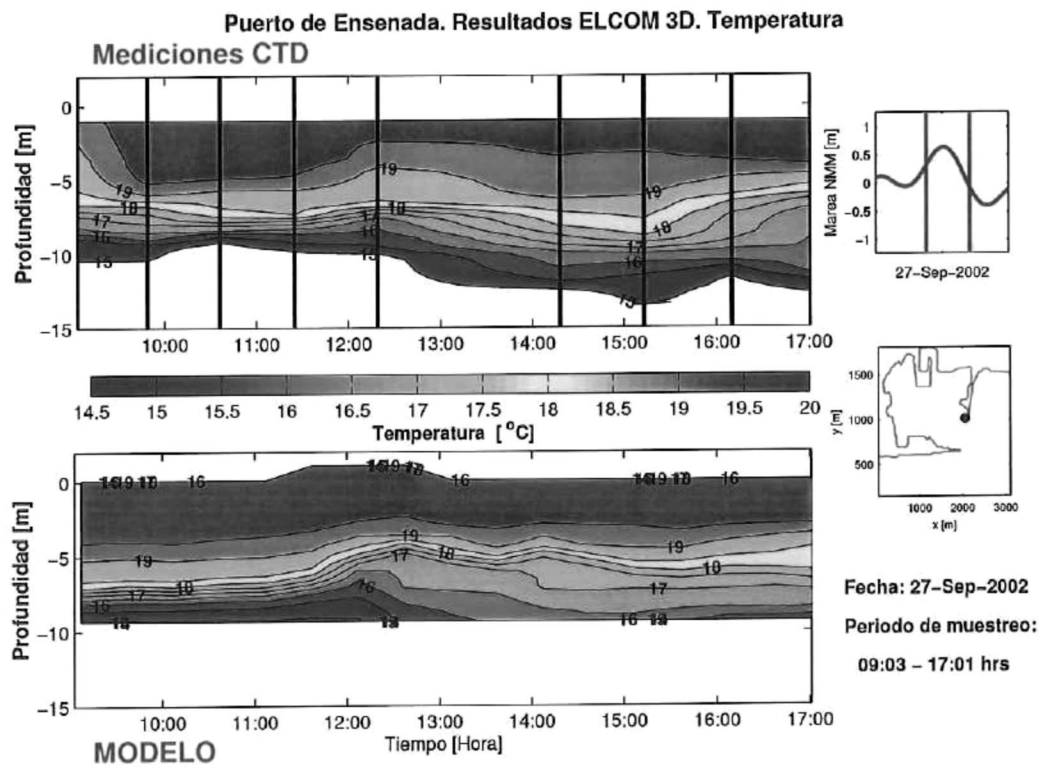


Figura 3.22: Serie de tiempo de temperatura para la estación C, comparada con resultados del modelo, entre las 09:03 y las 17:01 del 27-Sep-2002

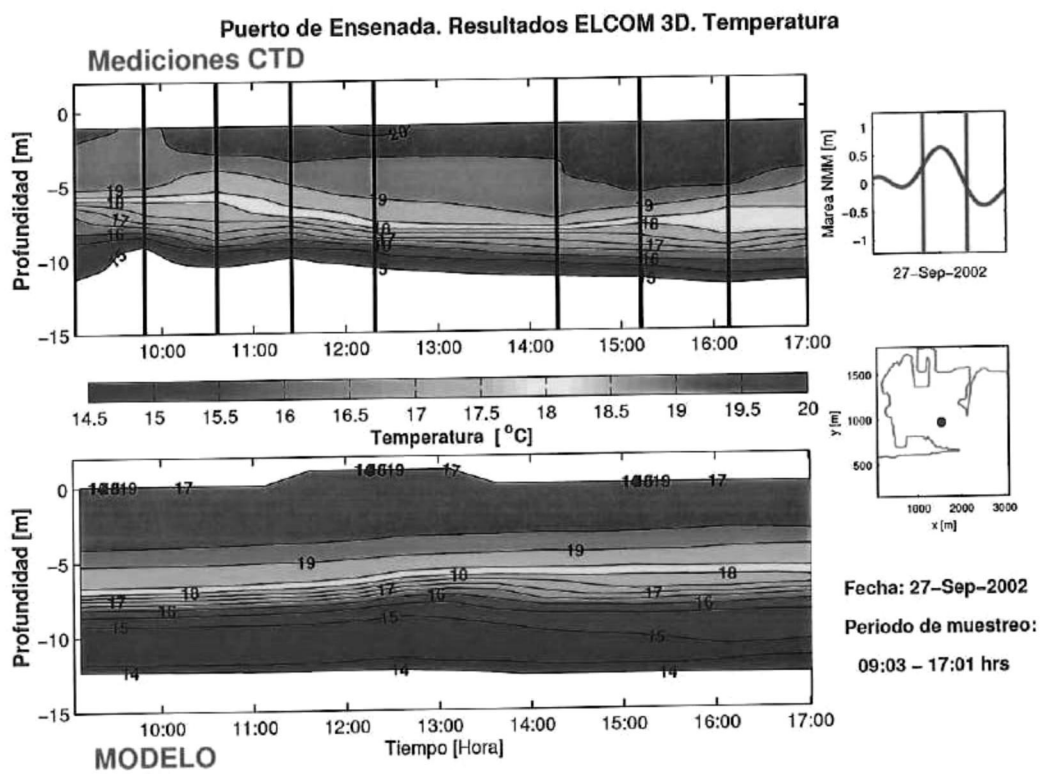


Figura 3.23: Serie de tiempo de temperatura para la estación D, comparada con resultados del modelo, entre las 09:03 y las 17:01 del 27-Sep-2002

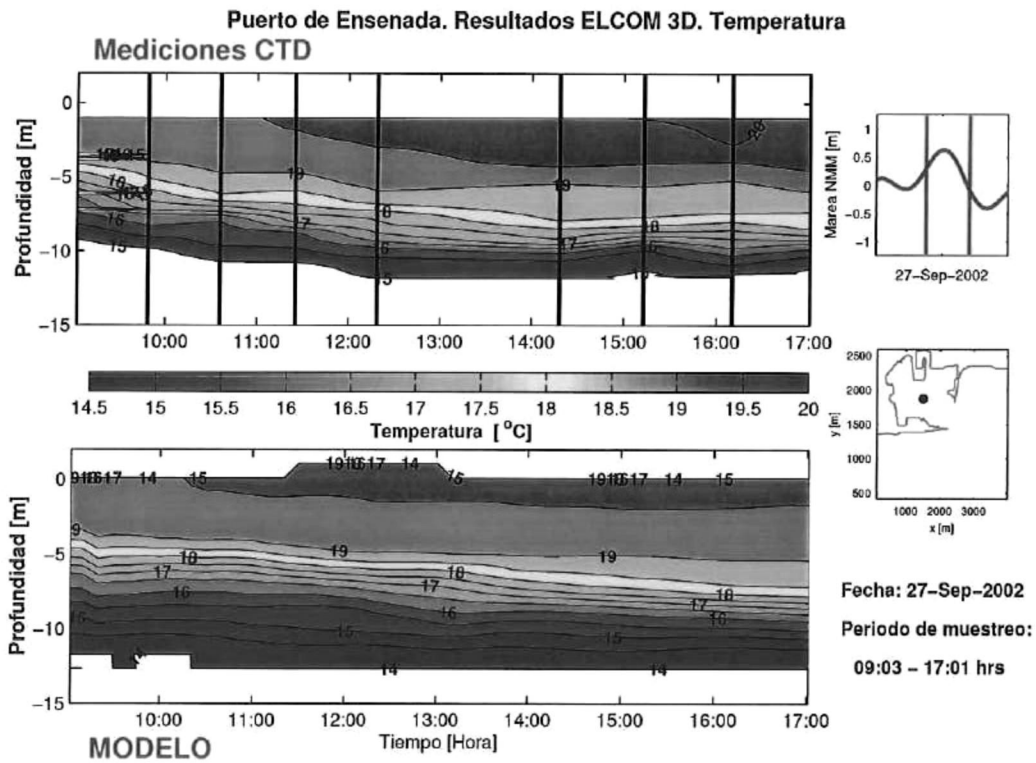


Figura 3.24: Serie de tiempo de temperatura para la estación E, comparada con resultados del modelo, entre las 09:03 y las 17:01 del 27-Sep-2002

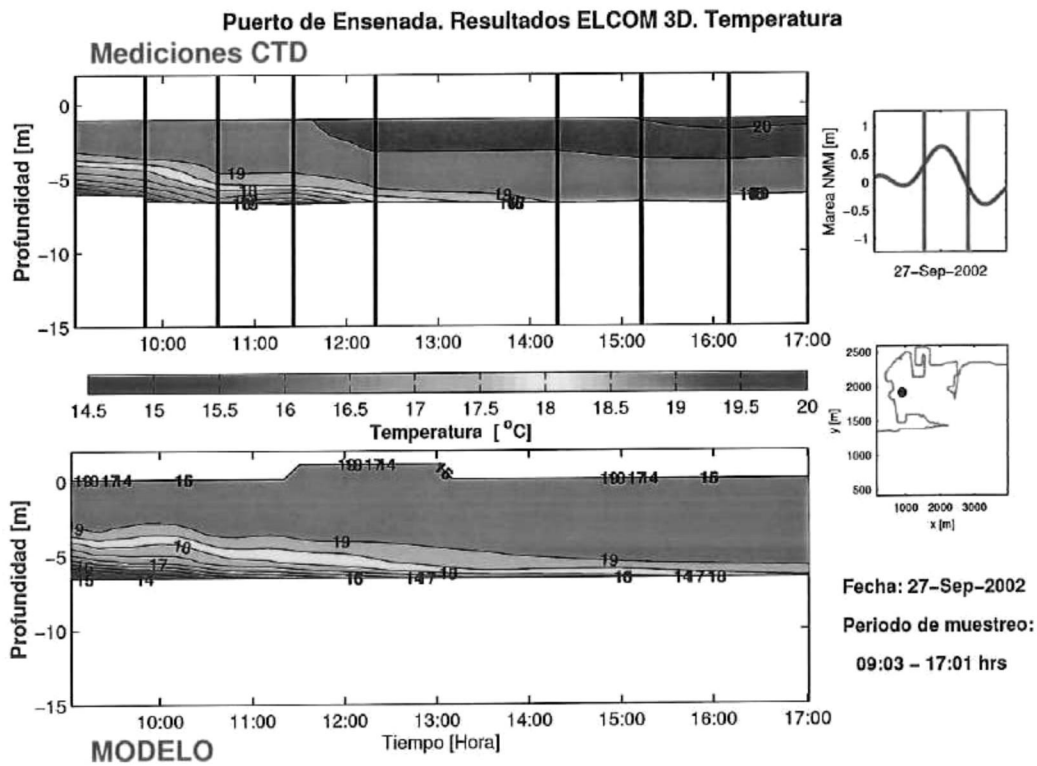


Figura 3.25: Serie de tiempo de temperatura para la estación F, comparada con resultados del modelo, entre las 09:03 y las 17:01 del 27-Sep-2002

Capítulo 4

Conclusiones

La aplicación del modelo tridimensional ELCOM en el Puerto de Ensenada permite formular las siguientes conclusiones:

1. Los resultados de las mediciones de campo con CTD, realizadas en el mes de Septiembre de 2002, muestran una estratificación importante, debida principalmente al gradiente de temperatura.
2. El modelo es operativo para el Puerto de Ensenada y produce el patrón de corrientes que se podrían esperar debido a la batimetría y a la amplitud de la marea. Los resultados de rapidez concuerdan en orden de magnitud con estudios realizados anteriormente.
3. La descarga de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ del SIBEO se comportó como una intrusión en la capa ubicada entre 6 y 7 m de la superficie y tuvo poca influencia en el fondo.
4. El modelo reproduce la estructura de la temperatura en diversas estaciones muestreadas, sin embargo existieron diferencias entre los datos de campo y los resultados del modelo para las estaciones cercanas a la boca de acceso. Esto se atribuye a la complejidad dinámica de esta zona y revela la necesidad de mejoras en el esquema de cerradura.
5. El patrón de circulación en el Puerto de Ensenada se rige principalmente por la onda de marea que penetra por la boca de acceso mientras que el forzamiento del viento tiene un efecto secundario, restringido a la capa superficial.

Literatura citada

- Abbott, M. y W. Price. 1993. *Coastal, Estuarial and harbour Engineers' reference book*. E and FN Spon. Primera edición.
- Álvarez-Sánchez, L. 1971. Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B.C., México. Tesis Profesional. UABC. Ensenada, B.C. 54 pp.
- Álvarez-Sánchez, L., R. Hernández-Walls y R. Durazo-Arvizu. 1988. Patrones de deriva de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **14**(4), 135–162.
- Antenucci, J. y J. Imberger. 2000. On internal waves near the high frequency limit in an enclosed basin. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, **106**, 22465–22474.
- Antenucci, J., J. Imberger y A. Saggio. 2000. Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnology y Oceanography*, **45**, 1621–1638.
- API. 2002. El Puerto de Ensenada y su entorno de mercado. Administración Portuaria Integral de Ensenada, S.A. de C.V. http://www.puertoensenada.org/el_puerto_y_su_entorno.html.
- Arakawa, A. y V. Lamb. 1977. Computational design of the basic dynamic processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, **17**, 173–263.
- Arce, D. 1984. Efectos de la contaminación orgánica en la zona costera de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California.
- Argote-Espinoza, M., F. Gavidia-Medina y A. Amador-Buenrostro. 1991. Wind-induced circulation in Todos Santos Bay, B.C., Mexico. *Atmósfera*, **4**, 101–115.
- Balas, L. y E. Ozhan. 2002. Three-dimensional modelling of stratified coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **54**, 75–87.

- Casulli, V. 1990. Semi-implicit finite-difference methods for the two-dimensional shallow water equations. *J. Comput. Phys.*, **86**, 56–74.
- Casulli, V. 1997. Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal coordinates. *Inter. J. for Num. Methods in Fluids*, **25**, 645–658.
- Casulli, V. 1999. A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free-surface flows. *Inter. J. for Num. Methods in Fluids*, **30**, 425–440.
- Casulli, V. y E. Cattani. 1994. Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. *Computers Math. Applic.*, **27**, 99–112.
- Casulli, V. y R. T. Cheng. 1992. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *Inter. J. for Num. Methods in Fluids*, **15**, 629–648.
- Casulli, V. y G. Stelling. 1998. Numerical simulations of 3d quasi-hydrostatic free-surface flows. *ASCE, J. Hydr. Eng.*, **124**, 678–686.
- Casulli, V. y R. Walters. 2000. An unstructured grid, three-dimensional model based on shallow water equations. *Inter. J. for Num. Methods in Fluids*, **32**, 331–348.
- Cheng, R. y V. Casulli. 2002. Evaluation of the unTRIM model for 3-D tidal circulation. En M. Spaulding, editor, *Estuarine and Coastal Modeling*, p. 628–641.
- Cheng, R., V. Casulli y J. Gartner. 1993. Tidal, residual, intertidal mudflat (TRIM) model and its applications to San Francisco Bay, California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **36**, 235–280.
- Coronado-Méndez, C.A., I. Ramírez, A. Ortíz y R. Blanco. 2002. Batimetría y perfiles de CTD en la Bahía y Puerto de Ensenada, B.C., México. Reporte Técnico. Comunicaciones Académicas. Serie Oceanografía Física. CICESE. CEOFT20021.
- Czitrom-Bauss, S. P. R., I. Núñez e I. Ramírez. 2002. Innovative uses of wave power: Environmental management of the Port of Ensenada, Mexico. *Journal of the Marine Technology Society*, En prensa.
- Delgadillo, H. y B. Orozco. 1987. Bacterias patógenas en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **13**, 31–38.
- Delgadillo, H. y B. Orozco. 1989. Contaminación fecal en sedimentos superficiales de la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **15**, 47–62.

- DLI. 2000. Vicgrid map projection. Technical report, Department of Land Information. Department of Finance. Victoria, Australia. <http://www.giconnections.vic.gov.au/content/docs/vicgrid/vic15.htm>.
- Durazo-Arvizu, R. y L. Álvarez. 1988. Cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **14**(1), 95–114.
- Fischer, H. B., E.J. List, R. C. Y. Koh, J. Imberger y N. Brooks. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press Inc.
- Fodzar, F.M., G.J. Parker y J. Imberger. 1985. Matching temperature and conductivity sensor response characteristics. *Journal of Physical Oceanography*, **15**(11), 1557–1569.
- Hernández-Walls, R. 1986. Circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de Licenciatura. UABC. Ensenada, B.C. 73 pp.
- Hodges, B.R. 2000. *Numerical Techniques in CWR-ELCOM*. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Hodges, B., J. Imberger, A. Saggio y K. Winters. 1999. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*. *en prensa*.
- Hofmann, E. 2000. Modeling for estuarine synthesis. *Estuarine Science*. Island Press, 129–148 pp.
- Jiménez-Pérez, L., F. Molina-Peralta y E. Núñez-Fernández. 1992. Efectos de las aguas residuales sobre la macrofauna bentónica de playas arenosas en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **13**(1), 35–54.
- Kolluru, V., E. Buchack, J.E. Edinger y P. Brinkmann. 2001. Three-dimensional thermal modeling of the RAS-GAS water outfall. En M. Spaulding, editor, *Estuarine and Coastal Modeling*, p. 893–912.
- Laval, B., J. Imberger y A. Findikakis. 2001a. Dynamics of a large tropical lake. En preparación
- Laval, B., J. Imberger y B.R. Hodges. 2001b. Numerical diffusion in 3d, hydrostatic, z-level, lake models. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*.
- Leendertse, J., R. Alexander y S. Liu. 1973. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: principles of computation. *The RAND Corporation (California)*. Reporte Interno

- Leonard, B. 1991. The ultimate conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, **88**, 17–74.
- Tennessee Valley Authority. 1972. Heat and mass transfer between a water surface and the atmosphere. Laboratory Report 14, Division of Water Control Planning Engineering Laboratory. Water Resources Research. Norris, Tennessee.
- Morales, C. R. 1984. Colimetría en descarga de aguas industriales, domésticas y en la zona de rompientes de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California.
- Ocampo-Torres, F. 1983. Circulación en la Bahía de Todos Santos. Reporte de Datos 83-01. UABC. 43 pp.
- Orozco, B. y G. Gutiérrez. 1983. Contaminación fecal costera en la zona del Puerto de Ensenada, Baja California. *Ciencias Marinas*, **9**, 27–34.
- Ramírez, I. 1999. *Hydrodynamics of a Shallow Lagoon*. Ph.D. thesis, Centre for Water Research. University of Western Australia.
- Ramírez, I. y J. Imberger. 2002. The numerical simulation of the hydrodynamics of Barbamarco Lagoon, Italy. *Applied Numerical Mathematics*, **40**, 273–289.
- Sañudo, W., D. Rivera, Z. Segovia, J. Orozco, M. Delgadillo y V. Del Valle. 1985. Estado actual de la contaminación en la Bahía de Todos Santos. *Instituto de Investigaciones Oceanológicas*. UABC. 32 pp.
- Sea-Bird. 2002. *SEASOFT-Win32: SBE Data Processing-Win32: CTD Data Processing and Plotting Software*. Sea-Bird Electronics, Inc. Software Release 5.26 and later.
- Segovia, Z. y D. Rivera. 1988. Efectos de desechos orgánicos en las zonas adyacentes a los efluentes de Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, **14**, 101–116.
- SEMAR (1974). Estudio geográfico de la región de Ensenada, B.C. Secretaría de Marina Armada de México.
- Torres-Rodríguez, J. y L. Gómez-Morín. 1989. Estimación cuantitativa y cualitativa del azolvamiento en el puerto de Ensenada, B.C., México. *Ciencias Marinas*, **15**(4), 39–50.
- USACE. (1989). *Engineering and Design - Environmental Engineering for Coastal Shore Protection*. United States Corps of Engineers, Department of the US Army. <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1204>.

- VanDooren-Osio, K. 1991. Cuantificación del volumen de sedimento depositado frente al rompeolas (lado no protegido) del puerto de Ensenada, B.C. Tesis de licenciatura. UABC. Ensenada, B.C., México. 63 pp.
- Yeates, P. 1999. *Modelling the effects of internal phosphorus cycling on the primary productivity of a stratified lake: Applied to Lake Kinneret, Isarel*. Tesis de Maestría, Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Young, E., J. Brown, K. Horsburgh y L. Fernand. 2001. Three-dimensional modelling of the summer circulation in the celtic sea. En M. Spaulding, editor, *Estuarine and Coastal Modeling*, p. 1-21.