

Simulación numérica de la hidrodinámica de un puerto y el efecto de un sistema de bombeo por energía de oleaje

Numerical simulation of the hydrodynamics of a port and effect of a wave-driven seawater pump

Xavier Flores-Vidal^{1*}
Isabel Ramírez-Aguilar¹
Steven Czitrom-Baus²

¹ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, CP 22860, Baja California, México
*E-mail: xflores@cicese.mx

² Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
UNAM
Ciudad Universitaria
México, D.F.

Recibido en marzo de 2004; aceptado en septiembre de 2004

Resumen

Con la finalidad de conocer el patrón de circulación, estratificación y mezcla dentro del puerto de El Sauzal, se adaptó un modelo numérico tridimensional. Paralelamente se obtuvieron datos hidrográficos en el puerto de El Sauzal, en los que se encontró a la temperatura como el agente que modifica el campo de densidad, ya que la salinidad tiene poca variación en este sistema. Debido a lo anterior, el modelo simuló solamente el patrón de distribución de temperatura y corrientes. La simulación fue validada con datos de campo, demostrando que el modelo reproduce adecuadamente el patrón de circulación, estratificación y mezcla. El principal forzamiento de la circulación superficial y mezcla vertical en este sistema fue la variación del nivel de mar; sin embargo, el viento superior a 6 m s^{-1} se convirtió en el principal forzamiento del patrón de circulación y mezcla. Durante la bajamar la dirección de la corriente superficial fue hacia afuera del puerto y viceversa durante la pleamar; sin embargo, cuando el viento tuvo velocidades superiores a 6 m s^{-1} , la dirección de las corrientes siguió la dirección del viento. Durante la bajamar, al introducir una descarga de $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ al sistema, la simulación presentó un incremento de 0.5 cm s^{-1} en la velocidad de las corrientes superficiales. La estructura vertical de temperatura presentó un incremento generalizado hasta igualar la temperatura de la descarga (17.2°C). Este resultado indica que una descarga controlada puede ser capaz de mejorar la circulación y mezcla, lo que podría reducir los tiempos de residencia y mejorar los niveles de oxígeno en el agua.

Palabras clave: puerto, simulación numérica, circulación y mezcla.

Abstract

A three-dimensional numerical model was adapted to study the circulation, stratification and mixing patterns inside the port of El Sauzal. Salinity, temperature and density field data were measured, showing that density variations were mainly due to the temperature field with a very small contribution from salinity. The model simulated surface currents and the temperature field. The simulation was compared against field data showing that the model reproduces satisfactorily the circulation, stratification and mixing patterns. Surface circulation and vertical mixing were mainly forced by the tide, although winds greater than 6 m s^{-1} became the main forcing of vertical mixing and surface circulation. The surface currents traveled outside the port during ebb tide and vice versa during flood tide; however, with winds greater than 6 m s^{-1} , the surface velocity followed the wind direction. When a discharge of $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ was introduced into the system, the simulation showed an increase of 0.5 cm s^{-1} in the surface current velocity, during ebb tide. The vertical temperature structure increased as much as the discharge temperature (17.2°C). This result verifies that a controlled discharge could improve circulation and mixing, reducing the residence time and improving the levels of oxygen in the water.

Key words: port, numerical simulation, circulation and mixing.

Introducción

Los modelos numéricos son una herramienta eficaz en el estudio de la hidrodinámica de cuerpos de agua semicerrados, reproduciendo las principales características de circulación y estratificación dentro del sistema (Ramírez e Imberger, 2002). Estos modelos presentan algunas ventajas sobre las observaciones, ya que permiten estudiar en forma aislada la influencia de cada una de las variables involucradas en la circulación (viento, variación del nivel del mar, batimetría, salinidad y temperatura entre otras). Es importante recordar que los modelos numéricos no sustituyen a las observaciones, sino que las complementan. Un cálculo por computadora no puede ser mejor que la validez de las aproximaciones hechas al representar un sistema con datos reales (Fischer *et al.*, 1979).

Los esfuerzos por describir la circulación costera en tres dimensiones iniciaron en los años setenta (Leendertse *et al.*, 1973; Arakawa y Lamb, 1977). Veinte años más tarde, el desarrollo de esquemas semi-implícitos de diferencias finitas trajo la familia de modelos numéricos TRIM (*Tidal, Residual, Intertidal Mudflat*), desarrollada por V. Casulli y colaboradores (Casulli y Cattani, 1994), que han sido aplicados para describir distintos sistemas, usando o no aproximaciones hidrostáticas. Los modelos TRIM han sido aplicados en diversos estudios como circulación en la Bahía de San Francisco y en Venecia (Cheng *et al.*, 1993), y patrones de mezcla y plumas boyantes en la Laguna Barbamarco, Italia (Ramírez e Imberger, 2002).

En los últimos años se han observado anoxia, malos olores y trazas de metales pesados en agua y sedimentos del puerto de El Sauzal, Baja California, México (Segovia-Zavala *et al.*, 1988). El manejo de estos contaminantes requiere un conocimiento adecuado de los procesos de estratificación y mezcla dentro del puerto, identificando las zonas más afectadas. Trabajos anteriores (Flores *et al.*, 2003) han encontrado que el puerto experimenta niveles considerables de estratificación. El reducir los niveles de estratificación induce circulación y mezcla, lo que acelera la eliminación de contaminantes del agua (Nepf y Geyer, 1996). Se ha propuesto la inducción de una descarga controlada como una opción para reducir la estratificación, mejorar la circulación y reducir la contaminación (Czitrom *et al.*, 2002).

El objetivo del presente estudio fue simular, mediante un modelo numérico, el patrón general de circulación y estratificación en el puerto de El Sauzal. Al tener una descripción de los procesos que ocurren dentro del puerto, se pudo simular el efecto de una descarga sobre la dinámica del sistema.

Introduction

Numerical models are an effective tool for studying the hydrodynamics of semiclosed water bodies, since they reproduce the main circulation and stratification characteristics within the system (Ramírez and Imberger, 2002). The advantage of these models over observations is that they can be used to study the influence of each one of the variables involved in the circulation (wind, sea level variation, bathymetry, salinity, temperature, etc.). It is important to note that numerical models should not replace observations, but rather complement them. A computer calculation cannot be better than the validity of approximations made by representing a system with real data (Fischer *et al.*, 1979).

Efforts to describe coastal circulation in three dimensions began in the 1970s (Leendertse *et al.*, 1973; Arakawa and Lamb, 1977). Twenty years later, the development of semi-implicit finite difference schemes produced the TRIM (*tidal, residual, intertidal mudflat*) numerical models, developed by V. Casulli and colleagues (Casulli and Cattani, 1994) and applied to describe different systems with or without the use of hydrostatic approximations. TRIM models have been used in diverse studies; for example, to simulate the circulation in San Francisco Bay and Venice (Cheng *et al.*, 1993), and the mixing patterns and buoyant plumes in Barbamarco Lagoon, Italy (Ramírez and Imberger, 2002).

In recent years, anoxia, bad odours and traces of heavy metals have been observed in water and sediments from the port of El Sauzal in Baja California, Mexico (Segovia-Zavala *et al.*, 1988). The proper handling of these pollutants requires knowledge of the stratification and mixing processes that occur within the port to identify the most affected zones. Previous surveys (Flores *et al.*, 2003) have found that the port undergoes considerable levels of stratification. Reduced stratification induces circulation and mixing, which accelerates the elimination of pollutants from the water (Nepf and Geyer, 1996). The introduction of a controlled discharge has been proposed as an option to reduce stratification, improve circulation and reduce contamination (Czitrom *et al.*, 2002).

This study aimed to simulate, using a numerical model, the general circulation and stratification patterns in the port of El Sauzal. With a description of the processes that occur within the port it is possible to simulate the effect of a discharge on the dynamics of the system.

Study area

The port of El Sauzal is located 10 km north of Ensenada, in Todos Santos Bay, Baja California, Mexico (fig. 1). The harbour is separated from the bay by a 500-m-long breakwater and has a mouth approximately 100-m-wide through which vessels enter. The port is oriented NW–SE and has a total surface of 15×10^4 m². Its main navigation channel has maximum depths of 9 m.

Important fishery companies dedicated to extraction, processing and production activities are located in the port. The

Área de estudio

El puerto de El Sauzal se localiza dentro de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México (fig. 1), 10 km al norte del puerto y ciudad de Ensenada. Su rada portuaria está separada por un rompeolas de rocas, de 500 m de largo, y su comunicación con la bahía es a través de una entrada de aproximadamente 100 m de ancho que permite el acceso de las embarcaciones. El puerto de El Sauzal se orienta de noroeste a sureste y tiene una superficie total de 15×10^4 m². Su canal principal de navegación tiene profundidades máximas de 9 m.

En el puerto de El Sauzal se ubican importantes compañías dedicadas a la extracción, reducción, procesamiento y elaboración de productos pesqueros. El extremo noroeste del puerto es el más expuesto a descargas de sanguaza y desechos orgánicos de los barcos pesqueros, lo que lo convierte en una zona vulnerable a la contaminación. Desde los años ochenta, Rivera (1984) observó estados anóxicos, y algunas trazas de metales pesados en organismos filtro alimentadores, mientras que Segovia-Zavala *et al.* (1988) reportaron una elevada concentración de contaminantes de diversos tipos y prolongados tiempos de residencia. En los noventa, Núñez (1994) encontró acumulación de desechos orgánicos en los sedimentos. Estudios más recientes (Flores *et al.*, 2003) han reportado estratificación considerable, lo que junto con el interés por evaluar cualitativamente el efecto de una descarga introducida al sistema ha sido parte de la motivación para realizar este trabajo.

El modelo

Se adaptó un modelo numérico tridimensional para simular los procesos de circulación y estratificación dentro del puerto, bajo forzamientos meteorológicos y de marea. El modelo es capaz de simular respuestas barotrópicas y baroclínicas, forzamientos por marea, viento, calentamiento de la superficie libre, gradientes de densidad, afluentes y efluentes, además del transporte de sal y calor, y los campos de velocidades. Este modelo ha evolucionado del esquema de TRIM y ha sido utilizado en Laguna de Barbamarco por Ramírez e Imberger (2002), obteniendo óptimos resultados.

Las ecuaciones básicas del modelo describen flujos de superficie libre con densidad variable y son derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles suponiendo una presión hidrostática. Las ecuaciones se resuelven sobre una malla cartesiana utilizando un método de diferencias finitas; para mayor detalle sobre la manera en que el modelo resuelve y aplica las ecuaciones y condiciones, tanto iniciales como de frontera, dirigirse a Casulli y Cheng (1992). Las ecuaciones básicas del modelo tienen la siguiente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f v \quad (1)$$



Figura 1. Puerto El Sauzal, Baja California, México. La flecha indica el lugar propuesto para la instalación del sistema de bombeo por energía de oleaje.

Figure 1. Port of El Sauzal, Baja California, Mexico. The arrow indicates the site proposed for the installation of a wave-driven seawater pump.

NW corner of the harbor is the most exposed to contamination by blood and organic waste discharged from fishing boats and is consequently vulnerable to pollution. In the 1980s, Rivera (1984) observed anoxic states and traces of heavy metals in filter-feeding organisms, while Segovia-Zavala *et al.* (1988) reported high concentrations of diverse pollutants and high residence times. In the 1990s, Núñez (1994) found accumulation of organic wastes in sediments. Recent studies (Flores *et al.*, 2003) have reported significant stratification and this, together with the idea of qualitatively evaluating the effect of a discharge introduced into the system, motivated the present work.

The model

A three-dimensional numerical model was adapted to simulate the circulation and stratification processes that occur within the port of El Sauzal, under meteorological and tidal forcing. The model is capable of simulating barotropic and baroclinic responses, tidal forcing, wind, free-surface heating, density gradients, affluents and effluents, salt and heat transport, and velocity fields. The model evolved from a TRIM scheme that was used at Barbamarco Lagoon (Italy) by Ramírez and Imberger (2002), producing optimum results.

The model's basic equations describe free-surface flows with variable density and are derived from the Navier-Stokes equations for incompressible fluids assuming a hydrostatic pressure. The equations are solved on a Cartesian mesh using a finite difference method; see Casulli and Cheng (1992) for further details on how the model solves and applies the equations and conditions, both initial and boundary. The basic equations of the model are as follows:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + fu \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

donde u , v y w son las componentes de la velocidad en la dirección x , y y z , respectivamente, t es el tiempo, η es la elevación de la superficie del agua con respecto al nivel medio del mar, g es la aceleración de la gravedad y f es el parámetro de Coriolis. El coeficiente de viscosidad-difusividad horizontal, μ , se consideró constante e igual a $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. El coeficiente de viscosidad-difusividad vertical, ν , se supuso constante e igual a $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Estos parámetros fueron introducidos al modelo de la misma manera que lo hicieron Casulli y Cheng (1992), respetando los valores con que el modelo es estable y considerando aguas poco profundas, con salinidades superiores a 30 ups y temperaturas entre 5°C y 30°C .

La ecuación de convección-difusión esta definida por

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \mu \frac{\partial \eta}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (3)$$

donde $C(x, y, z, t)$ en este caso particular fue considerada la temperatura.

La ecuación hidrostática está definida como: $\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g$, con $\rho = \rho_0 + \rho'(S)$ donde ρ es la densidad, ρ_0 es la densidad de referencia del agua y $\rho'(S)$ es la diferencia de densidad entre el agua dulce y el agua salada.

La forma estándar de la condición límite en la superficie del agua ($z = \eta$) está definida por,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w_z = \eta - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (4)$$

La misma formulación se utiliza en el fondo, para $z = -h$, definiendo la condición de límite cinemático,

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

Las condiciones en la superficie están especificadas por el esfuerzo del viento,

$$\tau_x = \frac{\rho_a C_D U \sqrt{U^2 + V^2}}{\rho_o} ; \quad \tau_y = \frac{\rho_a C_D V \sqrt{U^2 + V^2}}{\rho_o} \quad (6)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre, ρ_a es la densidad del aire y U y V son las componentes de la velocidad del viento en la dirección x y y , respectivamente.

where u , v and w are the components of velocity in direction x , y and z , respectively; t is the time; η is the height of the water surface relative to mean sea level; g is the acceleration of gravity; and f is the Coriolis parameter. The horizontal and vertical viscosity-diffusivity coefficients were assumed constant, as $\mu = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and $\nu = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectively. These parameters were introduced in the model following Casulli and Cheng (1992), respecting the values with which the model is stable and considering shallow waters, with salinities above 30 psu and temperatures between 5°C and 30°C .

The convection-diffusion equation is defined by

where $C(x, y, z, t)$, in this particular case, was considered temperature.

The hydrostatic equation is defined as $\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g$, with $\rho = \rho_0 + \rho'(S)$, where ρ is the density, ρ_0 is the reference water density and $\rho'(S)$ is the difference in density between fresh and salt water.

The standard form of the boundary condition at the water surface ($z = \eta$) is defined by

The same formula is used for the bottom, for $z = -h$, defining the kinetic boundary condition,

Conditions on the surface are specified by the wind stress,

where C_D is the drag coefficient, ρ_a is the air density and U and V are the components of wind speed in direction x and y , respectively.

Al integrar la ecuación de continuidad sobre la profundidad y usando la condición cinemática en la superficie libre, podemos definir la ecuación de elevación de la superficie libre como

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz = 0 \quad (7)$$

donde h es la profundidad del agua con respecto al nivel medio del mar y H es la profundidad total del agua definida de la forma siguiente: $H(x, y, t) = h(x, y) + \eta(x, y, t)$.

Los efectos de compresibilidad en la ecuación de estado para la densidad son insignificantes en zonas poco profundas con salinidades superiores a 30 ups y con temperaturas entre 10°C y 25°C. La densidad del agua fue calculada utilizando la ecuación de estado de la UNESCO. El gradiente de la elevación superficial en las ecuaciones de momento, la velocidad en la ecuación de superficie libre y el coeficiente de difusión vertical fueron discretizados implícitamente. La convección, el parámetro de Coriolis y la viscosidad horizontal se discretizaron explícitamente.

El intervalo de simulación Δt es el tiempo en que el modelo realiza todas las operaciones, y debido a que éste fue adaptado para funcionar de manera baroclínica, cuenta con una restricción. Esta restricción depende directamente del espaciamiento horizontal (Δx , Δy) de la malla cartesiana y es conocida como condición de Courant-Friedrichs-Lewy para ondas internas. Casulli y Cattani (1994) definieron el paso de simulación como: $\Delta t \leq \left[2\mu \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right]^{-1}$, donde μ fue considerado constante, y por lo que para esta simulación Δt fue fijado en 8 segundos.

La simulación

Al inicio el modelo fue alimentado con los siguientes datos: batimetría, temperatura y salinidad en la frontera abierta, condiciones iniciales de temperatura y salinidad dentro del puerto, forzamientos ambientales en todo el dominio, forzamiento de marea en la frontera abierta y características de una descarga simulada.

La distribución de profundidades (batimetría) fue obtenida en junio de 2002 y reportada por Coronado *et al.* (2002). Para introducir la batimetría al modelo se realizó una interpolación triangular de los datos de profundidad sobre una malla de 10 × 10 m. La malla fue introducida al modelo en forma de una matriz de profundidades, manteniendo el espaciamiento horizontal (Δx , Δy) constante de 10 m y el espaciamiento vertical (Δz) de 0.5 m. Debido a que la fase de la marea es paralela a las isobatas de profundidad (Argote-Espinoza *et al.*, 1991), la malla de profundidades fue rotada 38° para alinear la frontera abierta con el eje x , de esta manera el modelo sigue el forzamiento real de propagación de la marea. La batimetría incluida al modelo se muestra en la figura 2.

Integrating the continuity equation over depth and using the free-surface kinetic condition, we can define the free-surface elevation as

where h is water depth relative to mean sea level and H is total water depth defined as follows: $H(x, y, t) = h(x, y) + \eta(x, y, t)$.

The effects of compressibility on the equation of state for density are insignificant in shallow areas with salinities greater than 30 psu and temperatures between 10°C and 25°C. Water density was calculated using UNESCO's equation of state. The gradient of the surface elevation in the moment equations, the velocity in the free-surface equation and the vertical diffusion coefficient were discretized implicitly. The convection, Coriolis parameter and horizontal viscosity were discretized explicitly.

The range of simulation Δt is the time it takes the model to carry out all the operations and since the model was adapted to run baroclinically, it has a restriction. This restriction depends directly on the horizontal spacing (Δx , Δy) of the Cartesian mesh and is known as Courant-Friedrichs-Lewy condition for internal waves. Casulli and Cattani (1994) defined the simulation step as $\Delta t \leq \left[2\mu \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right]^{-1}$, where μ was assumed constant; hence, for this simulation, Δt was set at eight seconds.

The simulation

The input data for the model were: bathymetry, temperature and salinity along the open boundary, initial temperature and salinity conditions in the port, environmental forcings throughout the domain, tidal forcing at the open boundary and characteristics of a simulated discharge.

Depth distribution (bathymetry) was obtained in June 2002 and reported by Coronado *et al.* (2002). To include the bathymetry in the model a triangular interpolation of the depth data on a 10 × 10 m mesh was necessary. The mesh was introduced in the model in the form of a depth matrix, maintaining the constant horizontal spacing (Δx , Δy) of 10 m and vertical spacing (Δz) of 0.5 m. Since the tidal phase is parallel to the depth isobaths (Argote-Espinoza *et al.*, 1991), the depth mesh was rotated 38° to align the open boundary with the x axis, and thus the model follows the real tidal propagation forcing. The bathymetry included in the model is shown in figure 2.

The open boundary was placed along the x axis, at 470 m from the breakwater (fig. 2). Density variation at the open boundary was assumed constant and homogeneous throughout the water column because of the mixing that occurs in the adjacent sea (fig. 3b). The port's initial temperature and salinity conditions were established using the profiles presented in figure 3a; as can be seen, the density field depends mainly on

La frontera abierta se colocó a lo largo del eje x , a 470 m del rompeolas (fig. 2). La variación de densidad en la frontera abierta se consideró constante y homogénea a lo largo de la columna de agua, debido a la mezcla que se presenta en el mar adyacente (fig. 3b). Las condiciones iniciales de temperatura y salinidad dentro del puerto se establecieron con los perfiles presentados en la figura 3a, donde se observa que el campo de densidad depende principalmente de la temperatura, ya que el gradiente de la salinidad es menos de 0.1 ups de la superficie al fondo. El perfil de la figura 3a fue obtenido en el centro del puerto y se aplicó a todo el dominio de la malla cartesiana. Esto nos proporcionó una condición inicial realista dentro del puerto y una interacción entre las condiciones del sistema y las condiciones en la frontera abierta.

Los forzamientos ambientales que se presentan en la figura 4 fueron proporcionados por SEMAR (Secretaría de Marina, Armada de México) y medidos con una estación meteorológica ubicada a 10 km del puerto de El Sauzal. Estas variables meteorológicas fueron aplicadas homogéneamente en todo el dominio. El viento (fig. 4d) presentó velocidades máximas de 10 m s^{-1} con direcciones dominantes del este. La radiación solar (fig. 4c) fue calculada teóricamente con base en la radiación incidente considerando un cielo despejado, igual que el observado durante el periodo del muestreo y simulación.

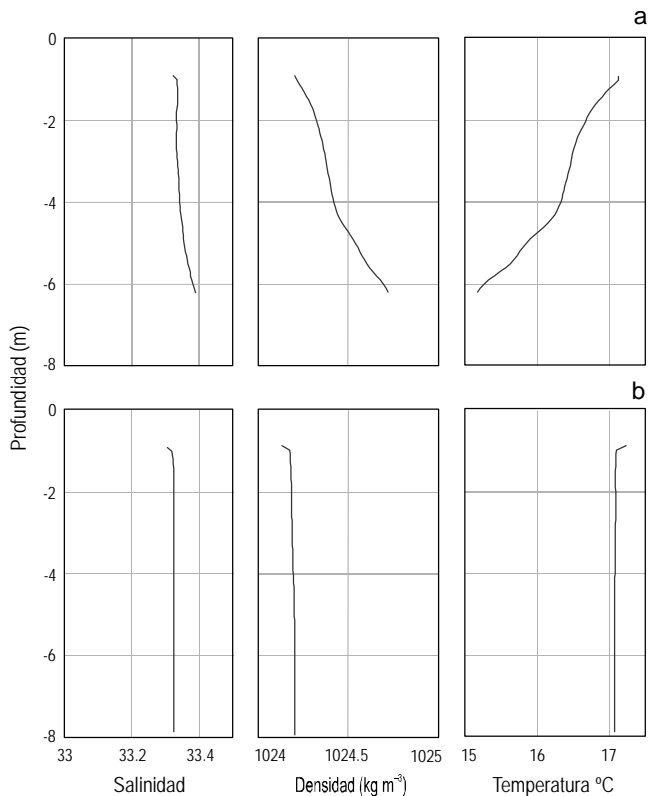


Figura 3. Perfiles de salinidad, temperatura y densidad con que se fijaron las condiciones (a) iniciales dentro del puerto y (b) en la frontera abierta.
Figure 3. Salinity, temperature and density profiles used to establish (a) the initial conditions within the port and (b) the conditions at the open boundary.

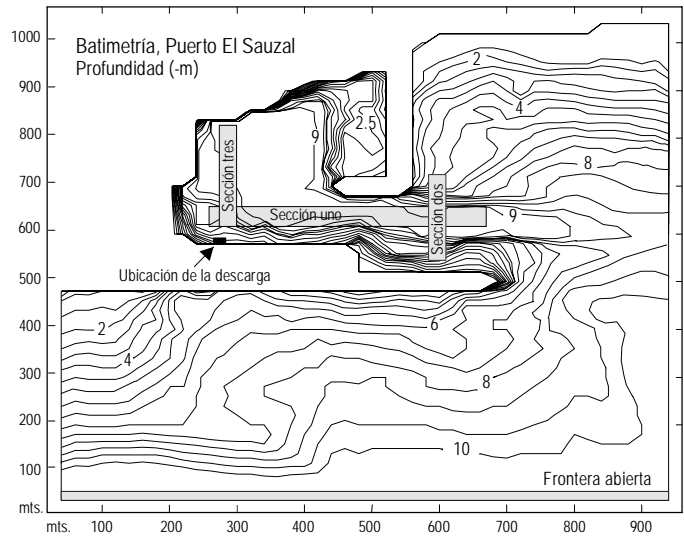


Figura 2. Batimetría del puerto de El Sauzal incluida en la simulación. La flecha indica la ubicación de la descarga simulada. La línea gruesa inferior indica la frontera abierta. Las secciones uno, dos y tres fueron elegidas para presentar resultados de la distribución vertical de temperatura.
Figure 2. Bathymetry of the port of El Sauzal included in the simulation. The arrow indicates the location of the simulated discharge. The lower thick line indicates the open boundary. Sections one, two and three were chosen to present the results of vertical temperature distribution.

temperature, since the salinity gradient is less than 0.1 psu, from the surface to the bottom. The profile in figure 3a was obtained from the middle of the port and applied to the entire domain of the Cartesian mesh. This provided a realistic initial condition within the port and an interaction between the conditions of the system and those at the open boundary.

The environmental forcings presented in figure 4 were provided by SEMAR (Mexican Naval Ministry) and measured at a meteorological station located 10 km from the port of El Sauzal. These meteorological variables were applied homogeneously throughout the domain. Easterly winds prevailed with maximum speeds of 10 m s^{-1} (fig. 4d). Solar radiation (fig. 4c) was calculated theoretically based on incident radiation considering a clear sky, similar to that observed during the sampling period and simulation. Air temperature (fig. 4b) reached maximum values of 29°C on 28 March, while minimum humidity values (fig. 4a) occurred during this same period; this together with the strong increase in the magnitude of the wind (greater than 6 m s^{-1}) indicates what is known locally as Santa Ana conditions. Sea level variation was recorded by a tide gauge belonging to SEMAR. Tidal forcing was applied at the open boundary and is shown in figure 4e. A semidiurnal tide was observed with a maximum of 1.4 m and a minimum of -1.3 m .

To simulate a discharge, we selected a cell at the base of the breakwater (fig. 2). The location of the discharge coincides with the section of the port (NW corner) that is most susceptible to pollution because of the wastes continuously discharged by boats. To maintain the installation characteristics of a wave-driven seawater pump proposed by Czitrom *et al.* (2002), the

La temperatura del aire (fig. 4b) alcanzó valores máximos de 29°C durante el 28 de marzo, y la humedad (fig. 4a) presentó valores mínimos en ese mismo periodo, lo que junto con el fuerte incremento en la magnitud del viento (superior a 6 m s^{-1}) se conoce localmente como vientos de Santa Ana. La variación del nivel de mar fue obtenida con un mareógrafo de SEMAR. El forzamiento de marea fue aplicado en la frontera abierta y se presenta en la figura 4e. Se observó una marea semidiurna con máximos de 1.4 m y mínimos de -1.3 m .

Para la simulación de una descarga se eligió una celda en la base del rompeolas (fig. 2). La ubicación de la descarga se debe a que es esta sección del puerto (esquina noroeste) la más vulnerable a contaminación, debido a las continuas descargas de los barcos. Para mantener las características de instalación de un SIBEO (Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje), propuesta por Czitrom *et al.* (2002), la descarga fue simulada con una temperatura constante en la vertical y en el tiempo (fig. 4f). La magnitud de la descarga fue de $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y temporalmente constante.

El periodo de simulación fue de las 0:00 h del 26 de marzo a las 23:59 h del 28 de marzo. Se obtuvieron datos horarios de salinidad, temperatura, densidad y velocidad de las corrientes en todo el puerto. Se presentan sólo los patrones de distribución de temperatura y de corrientes superficiales, debido a que sólo estas variables presentan una variación adecuada para apreciar la dinámica del sistema.

En la siguiente sección se presentan los resultados para la capa superficial del puerto y para tres secciones verticales (fig. 2). Las secciones verticales o cortes transversales fueron elegidos de acuerdo con su importancia dinámica (canal principal, boca y sección más alejada de la boca), con la capacidad de validar los resultados de la simulación con datos reales y con la tendencia a la estratificación reportada en trabajos anteriores (Núñez, 1994; Flores *et al.*, 2003).

Resultados y discusión

Se realizó una primera simulación del puerto tal y como se encuentra en la actualidad, obteniendo resultados comparables con las mediciones realizadas. En una segunda simulación se incluyó la descarga que produciría el SIBEO, dejando sin modificar los forzamientos del modelo.

Simulación sin descarga

La figura 5 nos muestra la distribución vertical de la temperatura durante la primera simulación. En los paneles de la izquierda se presentan las tres secciones bajo las mismas condiciones de marea y ambientales (temperatura del aire = 18°C y viento moderado $< 5 \text{ m s}^{-1}$). La temperatura máxima en la capa superficial (0 a 0.5 m) fue de 17°C en las tres secciones, mientras que en el fondo se observó una temperatura mínima de 15.4°C . Los primeros 3 m de profundidad se observaron mezclados a una temperatura media de 16.8°C . La estratificación

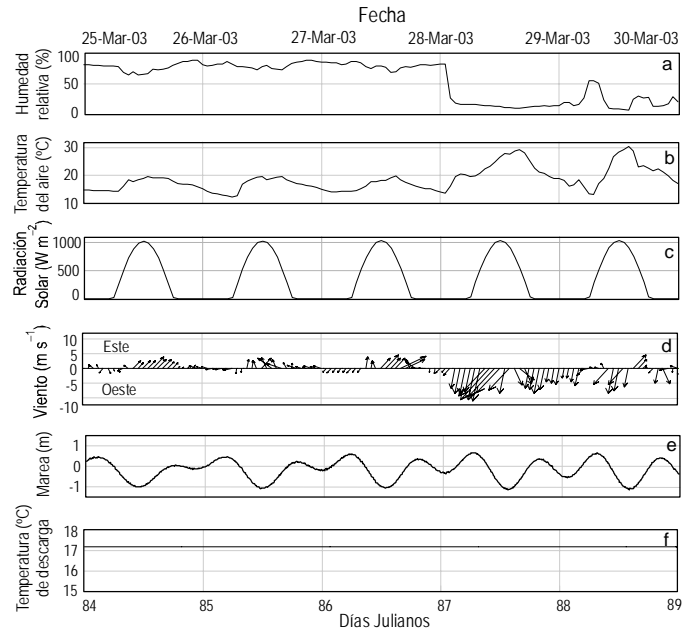


Figura 4. Series de tiempo de (a) humedad relativa, (b) temperatura del aire, (c) radiación solar y (d) dirección y magnitud del viento, incluidas al modelo como forzamiento ambiental. (e) Serie de tiempo del forzamiento de marea en la frontera abierta. (f) Serie de tiempo constante de la temperatura de la descarga simulada.

Figure 4. Time series of (a) relative humidity, (b) air temperature, (c) solar radiation and (d) wind direction and magnitude, included in the model as environmental forcings. (e) Time series of tidal forcing along the open boundary. (f) Constant time series of temperature in the simulated discharge.

discharge was simulated with a constant temperature, vertically and in time (fig. 4f). The magnitude of the discharge was $0.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and temporarily constant.

The simulation period extended from 00:00 h on 26 March to 23:59 h on 28 March. Hourly data were obtained for salinity, temperature, density and current velocity throughout the port of El Sauzal. Only the patterns of temperature distribution and surface currents are given because only these variables present a variation that is suitable to appreciate the dynamics of the system.

In the following section we present the results obtained for the surface layer and three vertical sections (fig. 2). The vertical sections or transverse cuts were chosen based on their dynamic importance (main channel, mouth and section farthest from the mouth), on the capability of validating the simulation results with real data and on the tendency toward stratification reported in previous works (Núñez, 1994; Flores *et al.*, 2003).

Results and discussion

The first simulation of the port of El Sauzal was done as it is at present, and the results obtained were comparable to the measurements made. In the second simulation a discharge produced by a wave-driven seawater pump was included, without modifying the model's forcings.

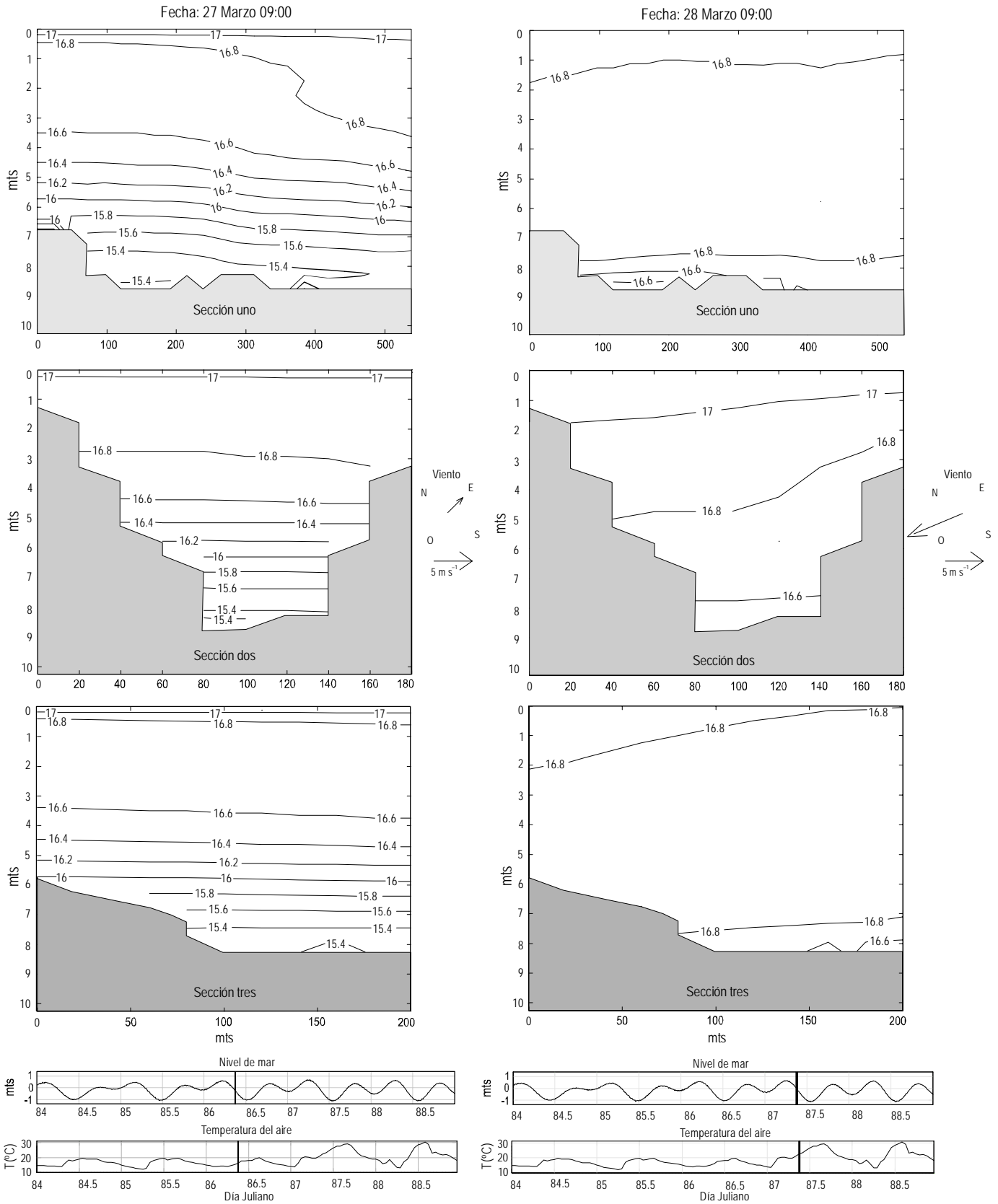


Figura 5. Distribución de la temperatura vertical en las tres secciones elegidas para la visualización. Simulación sin descarga.
 Figure 5. Vertical temperature distribution in the three sections chosen for the visualization. Simulation without discharge.

fue notable por debajo de los 4 m de profundidad y con una diferencia de 1.2°C, entre el fondo y los 4 m de profundidad.

Los paneles de la derecha presentan las tres secciones 24 h después, bajo el mismo estado de marea pero con un incremento en la magnitud del viento (más de 6 m s⁻¹) y temperatura del aire de 22°C. En las tres secciones se observó la destrucción de la estructura estratificada, seguida de una mezcla en toda la columna de agua (16.8°C).

Las tres secciones presentaron un patrón muy similar, lo que podría indicar que la estructura vertical es la misma para todo el puerto. El cambio de 4°C en la temperatura del aire y el aumento en la velocidad del viento a más de 6 m s⁻¹ con un notable cambio en la dirección, sugieren que además de la mezcla provocada por la intensidad del viento hubo un incremento en la temperatura del agua dentro del puerto, desapareciendo completamente la isoterma de los 15.4°C en el fondo.

La figura 6a presenta el patrón de circulación superficial (0 a 0.5 m) durante la simulación sin descarga. En los paneles de la izquierda se observa el patrón de corrientes superficiales en forma vectorial sobre contornos de igual magnitud. En los paneles de la derecha se observa la distribución de la temperatura superficial para el mismo tiempo que los paneles de la izquierda. Se observa la variación de la circulación durante la bajamar y la pleamar, bajo condiciones de viento moderado (menos de 5 m s⁻¹) y con temperatura del aire de 15°C. La circulación superficial fue dominada por la pleamar y la bajamar, mostrando que los vectores de velocidad salen del puerto durante la bajamar y entran durante la pleamar, lo que es consistente con el intercambio de volumen de agua entre el puerto y la bahía. Se observaron velocidades superficiales medias de 0.5 cm s⁻¹ durante la bajamar y la pleamar. La velocidad máxima, de 0.6 cm s⁻¹, se observó durante la bajamar en la boca. La distribución de temperatura superficial presentó valores medios de 17°C antes del mediodía durante la bajamar y cercanos a 18°C después del mediodía durante la pleamar.

La figura 6b presenta las mismas variables que la figura 6a, 24 h después, bajo condiciones de viento superior a 6 m s⁻¹ y con temperatura del aire que aumentó de 20°C a 30°C entre la mañana y la tarde. En esta ocasión la circulación superficial fue dominada por el viento. Se observaron velocidades superficiales máximas de 2 m s⁻¹ en la boca durante el bajamar, donde es evidente que la dirección y magnitud del viento favorece la dirección de la corriente de marea. En el caso de la pleamar la corriente superficial debida al viento es frenada por la corriente de marea, que tiene dirección de propagación contraria. La distribución de temperatura superficial presentó valores medios de 17°C antes del medio día (baja mar) y de 17.7°C después del medio día, durante la pleamar. Este incremento en la temperatura del agua, podría deberse al incremento en la temperatura del aire entre la mañana y la tarde (20–30°C).

En general, en la figura 6(a, b) observamos que la dirección de la velocidad superficial sigue la pleamar y la bajamar sólo cuando el viento es moderado (menor de 5 m s⁻¹). Cuando la magnitud del viento es superior a 6 m s⁻¹ la dirección de la

Simulation without discharge

Figure 5 shows the vertical distribution of temperature during the first simulation. The left-hand plots show the three sections under the same tidal and environmental conditions (air temperature of 18°C and moderate winds below 5 m s⁻¹). The maximum temperature in the surface layer (0 to 0.5 m) was 17°C for the three sections, whereas the minimum temperature at the bottom was 15.4°C. The first 3 m depth was mixed, with a mean temperature of 16.8°C. Stratification was noticeable below 4 m depth, with a difference of 1.2°C from the bottom to 4 m depth.

The right-hand plots of figure 5 show the three sections 24 h afterwards, under the same tidal condition but with increased wind magnitude (more than 6 m s⁻¹) and an air temperature of 22°C. The three sections show the destruction of the stratification structure, followed by mixing throughout the water column (16.8°C).

A similar pattern was observed for the three sections, indicating that the vertical structure is the same throughout the port. The change of 4°C in air temperature and the increase in wind speed to more than 6 m s⁻¹ with a notable change in direction suggests that, in addition to the mixing caused by the wind intensity, there was an increase in water temperature within the port, the 15.4°C isotherm disappearing completely at the bottom.

Figure 6a presents the surface circulation pattern (0 to 0.5 m) during the simulation without discharge. The left-hand plots show the vectorial pattern of surface currents over contours of equal magnitude. The right-hand plots show the surface temperature distributions for the same time as the left-hand plots. The variation in circulation during ebb and flood tides is observed under moderate wind conditions (less than 5 m s⁻¹) and with an air temperature of 15°C. The surface circulation was dominated by tides, since the velocity vectors exit the port during ebb tide and enter during flood tide. This is consistent with the exchange of water between the port and the bay. Mean surface velocities of 0.5 cm s⁻¹ were observed during ebb and flood tides. A maximum velocity of 0.6 cm s⁻¹ occurred during ebb tide at the mouth. Mean surface temperature values were 17°C before midday during ebb tide and nearly 18°C after midday during flood tide.

Figure 6b presents the same variables as in figure 6a but 24 h afterwards, under wind conditions above 6 m s⁻¹ and with an air temperature that increased from 20°C to 30°C between the morning and afternoon. Surface circulation was dominated by the wind. Maximum surface velocities of 2 m s⁻¹ were observed at the mouth during ebb tide, and the direction and magnitude of the wind evidently favour the direction of the tidal current. During flood tide, the surface current produced by the wind is detained by the tidal current, which has an opposite propagation direction. Mean surface temperature values were 17°C before midday during ebb tide and 17.7°C after midday during flood tide. This increase in water temperature may

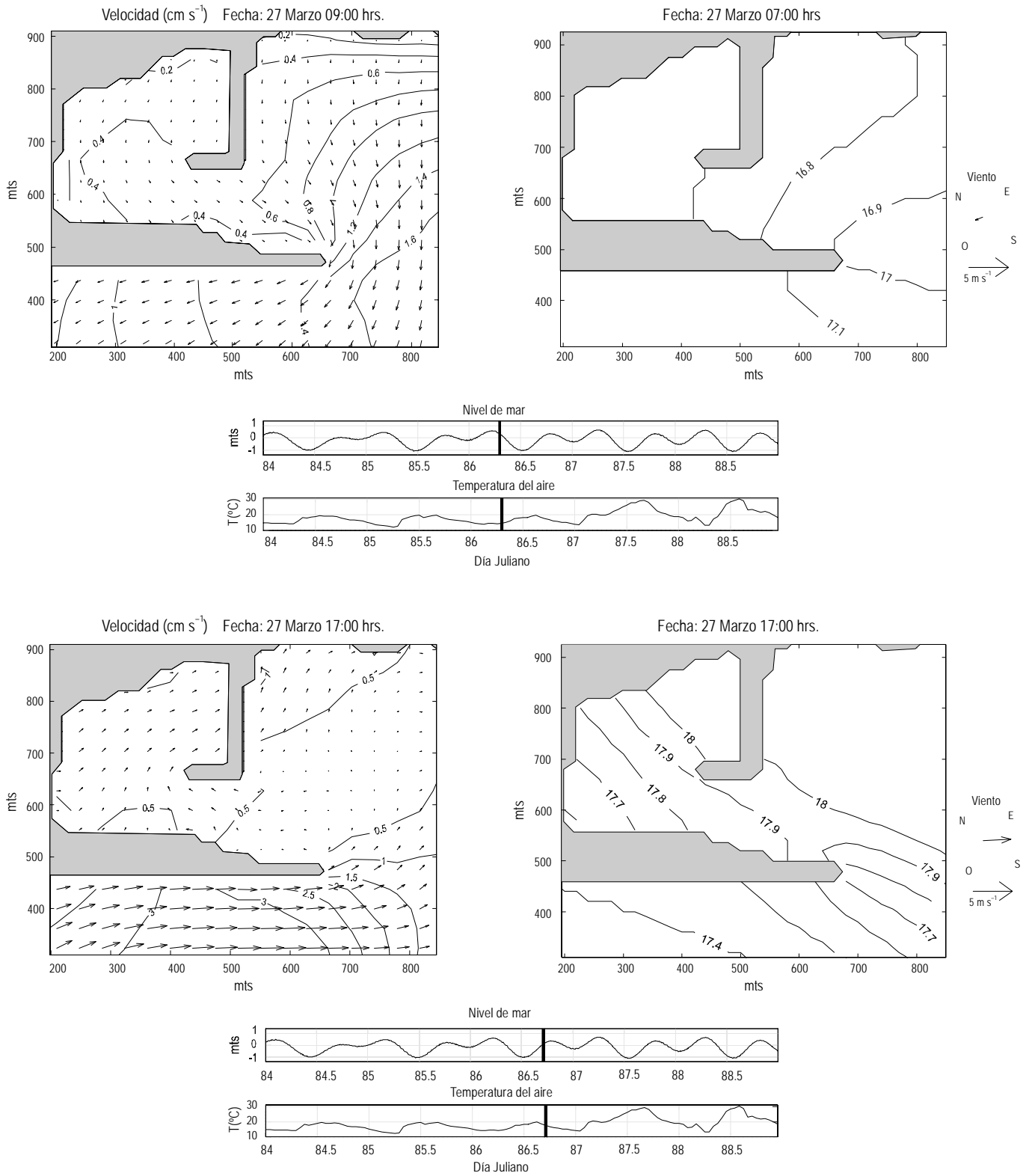


Figura 6a. Circulación superficial con viento moderado (menor de 5 m s^{-1}).
 Figure 6a. Surface circulation with moderate winds (less than 5 m s^{-1}).

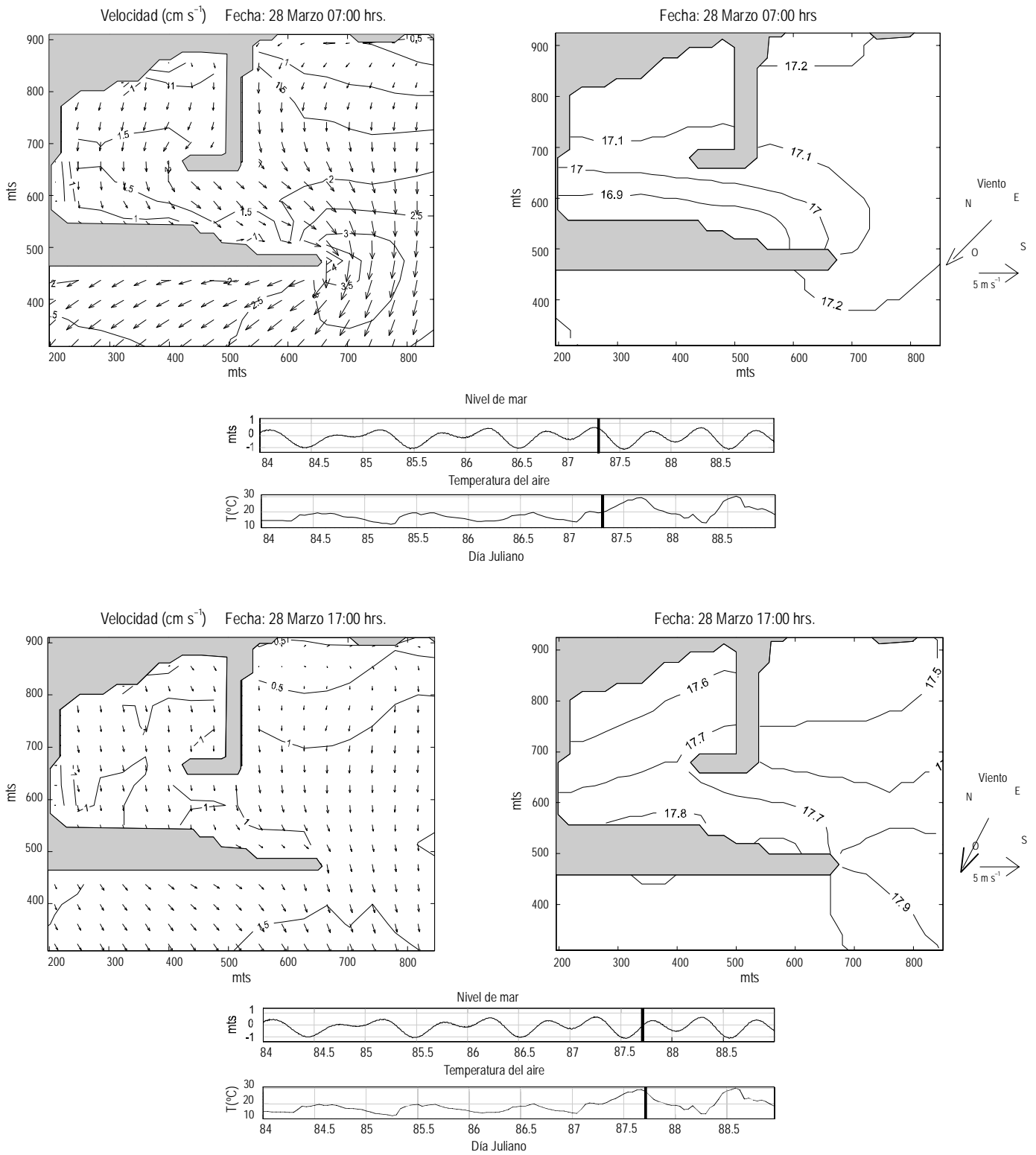


Figura 6b. Circulación superficial con viento fuerte (mayor de 6 m s^{-1}). Simulación sin descarga.

Figure 6b. Surface circulation with strong winds (greater than 6 m s^{-1}). Simulation without discharge.

corriente superficial sigue la dirección del viento. Los valores máximos de velocidad se presentaron en la boca, lo que seguramente se debe a la morfología del sistema. En cuanto al patrón de la temperatura superficial, se observó un incremento moderado en la temperatura de la figura 6a a la 6b; esto podría deberse al aumento de la temperatura del aire de 20°C a 30°C y ser favorecido por la mezcla producida por el viento.

Validación

Se presenta una validación cualitativa, donde se comparan datos de temperatura obtenidos en el puerto de El Sauzal el 27 de marzo, con los resultados de la simulación. Los datos se obtuvieron con un CTD con frecuencia de muestreo de 4 Hz y precisión de 0.05°C, con el que se realizaron dos muestreos separados 3 h y que han sido reportados por Flores *et al.* (2003).

En la figura 7(a, b) se comparan los datos de campo (paneles de la izquierda) obtenidos en las secciones uno y tres, con los resultados de la simulación (paneles de la derecha). La figura 7a muestra la temperatura vertical en la sección uno, durante la primer bajamar del 27 de agosto y durante el valor mínimo de la altura de la marea. A las 10 h, durante la bajamar, los datos y los resultados del modelo mostraron estratificación por debajo de los 4 m de profundidad y una inclinación de las isotermas propias de la marea saliendo; 2 h después el modelo reprodujo el patrón de las isotermas y la estratificación. Sin embargo, podemos observar una diferencia en la temperatura de fondo de 0.6°C, probablemente debida a un déficit en el esquema de mezcla del modelo.

La figura 7b presenta la temperatura en la sección tres durante los mismos estados de marea que la figura 7a. La figura muestra una resolución del modelo comparable a la sección uno, presentando una buena resolución de estratificación y la inclinación de las isotermas para los dos casos de marea en que se obtuvieron mediciones para comparar con el modelo.

La similitud entre la estructura vertical de temperatura de las secciones uno y tres también muestra que no existe una diferencia notable entre la distribución de temperatura vertical de las secciones, lo sugiere un patrón vertical similar en todo el puerto.

Es importante aclarar que la diferencia entre las profundidades de las secciones de los datos medidos y de la simulación, se deben a que al medir los datos algunas veces el instrumento no alcanzó el fondo.

La figura 8 presenta la comparación entre los datos de temperatura superficial obtenidos con el CTD y los resultados de la simulación. En los paneles de la izquierda se presenta la temperatura medida a 0.5 m de profundidad. Los contornos son una interpolación sobre una malla de 10 × 10 m, de las mediciones realizadas dentro del intervalo de tiempo a comparar.

En los paneles superiores (final de la bajamar) se observó una temperatura de 17°C en la parte noroeste y de 17.2°C en la parte norte, tanto en la simulación como en las mediciones. Sin embargo, la temperatura en la bahía fue 0.2°C mayor en la

be due to the increase in air temperature between the morning and afternoon (20–30°C).

In general, figure 6(a, b) shows that the direction of the surface velocity follows the ebb and flood tides only when the wind is moderate (less than 5 m s⁻¹). When the magnitude of the wind is greater than 6 m s⁻¹ the direction of the surface current follows the wind's direction. Maximum velocity values occurred at the mouth, probably because of the system's morphology. The moderate increase in surface temperature observed from figure 6a to 6b may be due to the 20–30°C increase in air temperature and may be favoured by the wind-generated mixing.

Validation

A qualitative validation was carried out by comparing temperature data obtained on 27 March at the port of El Sauzal with the results obtained from the simulation. The data were obtained using a CTD with sampling frequency of 4 Hz and precision of 0.05°C, during two samplings separated by 3 h, and were reported by Flores *et al.* (2003).

In figure 7(a, b), field data (left-hand plots) recorded in sections one and three are compared with the simulation results (right-hand plots). Figure 7a shows vertical temperature in section one during the first ebb tide of 27 August and during the minimum tidal height value. At 10 h, during ebb tide, the data and results of the model presented stratification below 4 m depth and an inclination of the isotherms belonging to the outgoing tide; 2 h later the model reproduced the pattern of the isotherms and stratification. Nevertheless, a difference in bottom temperature of 0.6°C can be observed, probably because of a deficit in the model's mixing scheme.

Figure 7b presents the temperature in section three during the same tidal stages as in figure 7a. The model's resolution is comparable to section one, showing a good stratification resolution and the inclination of the isotherms for both tidal stages during which measurements were obtained to compare with the model.

The similarity between the vertical temperature structure of sections one and three also shows that there is no notable difference in their vertical temperature distribution, indicating a similar vertical pattern throughout the port.

It is important to mention that when the data were measured the instrument occasionally did not reach the bottom and this accounts for the difference in the depths of the sections for the data measured and the simulation

The surface temperature data obtained with the CTD and the results from the simulation are compared in figure 8. The left-hand plots show the temperature measured at 0.5 m depth. The contours are an interpolation over a 10 × 10 m mesh of the measurements recorded within the time interval being compared. Both upper plots (end of ebb tide) corresponding to the field data and simulation show a temperature of 17°C in the northwestern part and of 17.2°C in the northern part; however, temperature in the bay was 0.2°C higher in the simulation,

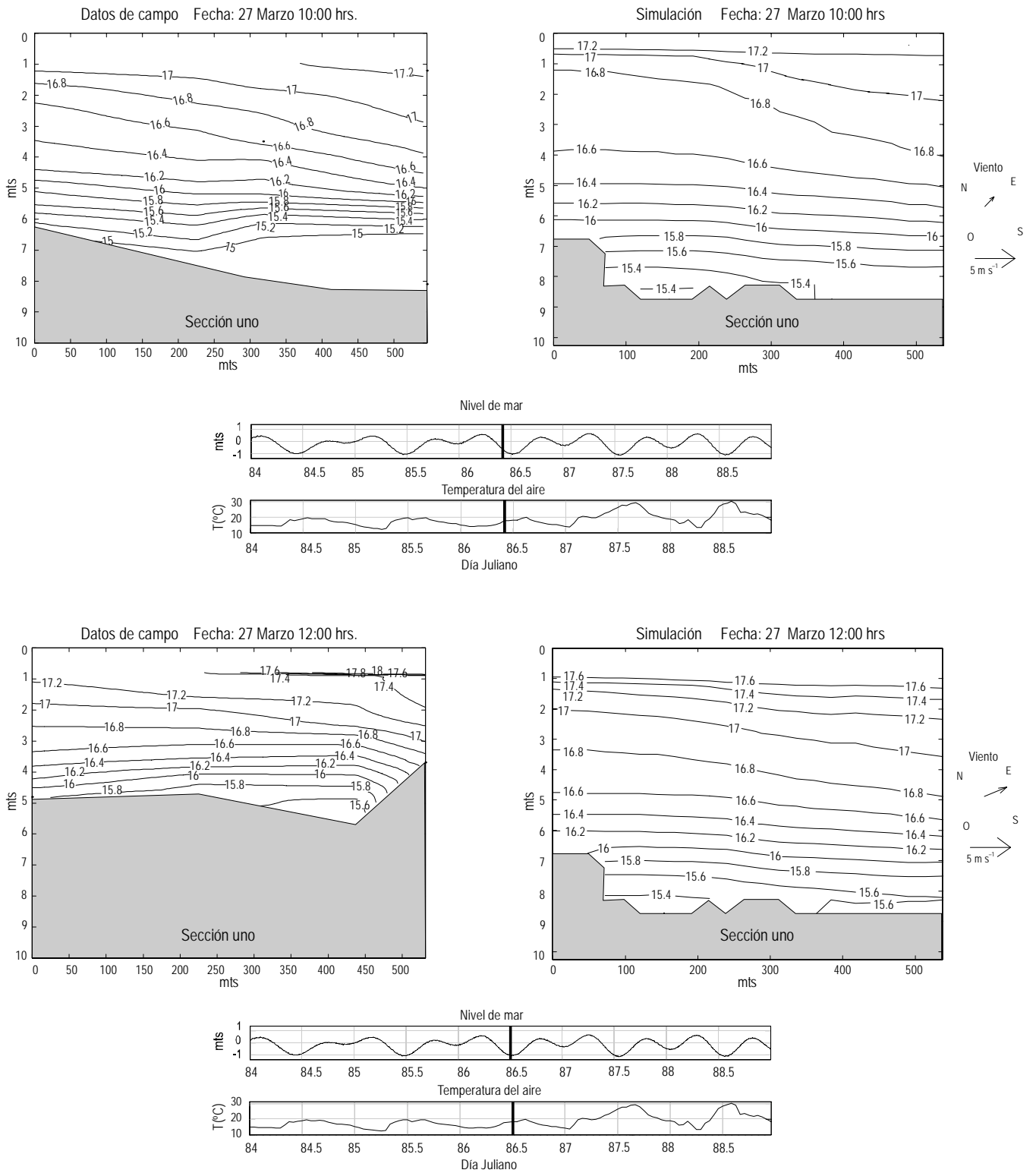


Figura 7a. Comparación de la temperatura medida en la sección uno y la simulada en la misma sección.
 Figure 7a. Comparison of the temperature measured and simulated in section one.

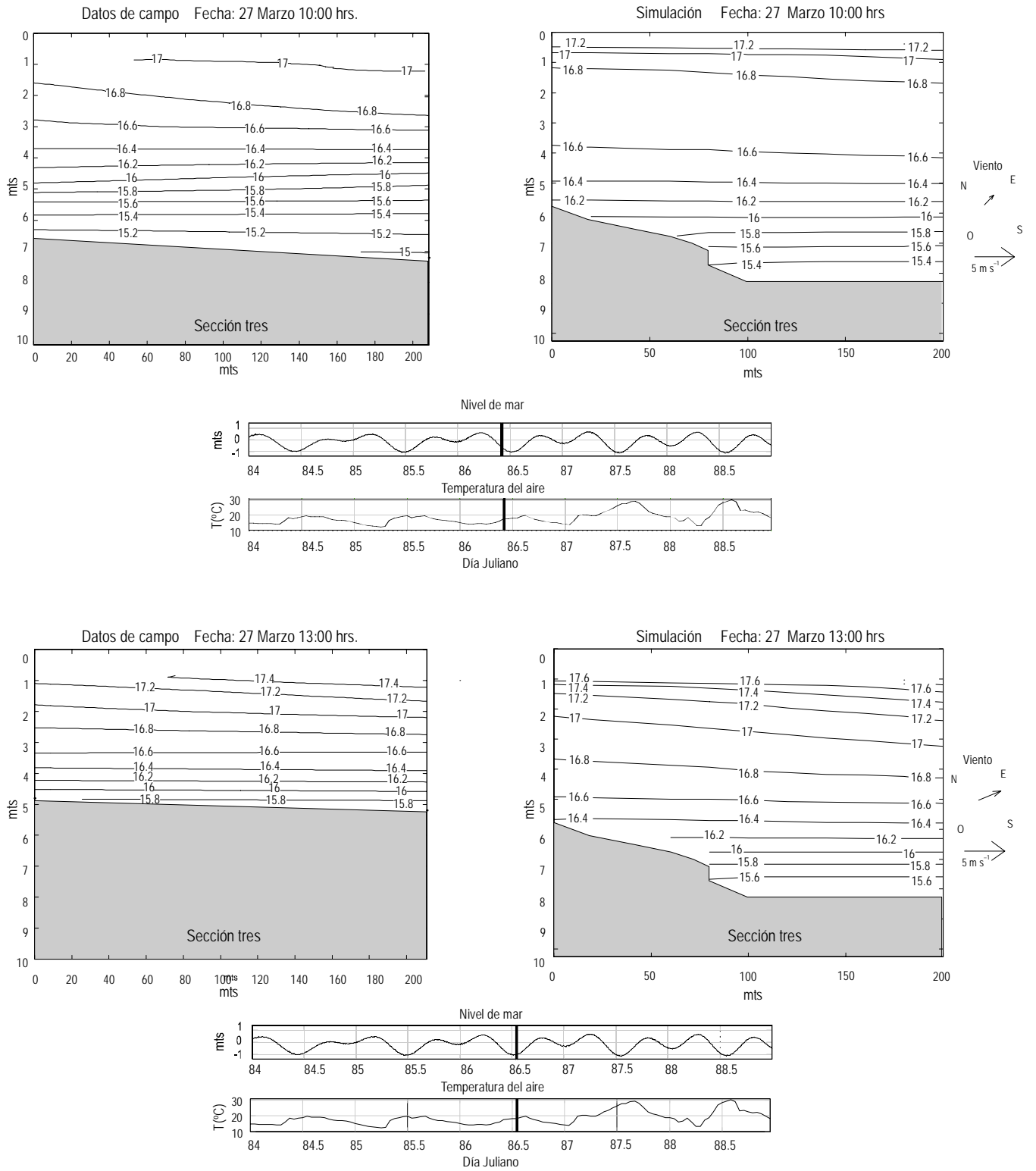


Figura 7b. Comparación de la temperatura medida en la sección tres y la simulada en la misma sección.
 Figure 7b. Comparison of the temperature measured and simulated in section three.

simulación, probablemente debido a la influencia de la frontera abierta impuesta al modelo.

En los paneles inferiores (inicio de la pleamar) observamos una temperatura de 17.3°C en la parte noroeste que se incrementa paulatinamente hasta alcanzar valores de 18°C en la parte norte. En esta figura se observa una mayor similitud entre las mediciones y la simulación, aun en la estructura sesgada de la distribución de la temperatura que fue satisfactoriamente reconstruida por el modelo.

Simulación de una descarga

La distribución vertical de la temperatura durante la segunda simulación al introducir la descarga que produciría el SIBEO se muestra en la figura 9. En los paneles de la izquierda, se presentan las tres secciones durante la bajamar, con viento moderado por debajo de 5 m s⁻¹ y temperatura del aire de 18°C. Al incluir la descarga, la temperatura vertical del sistema presentó un mínimo en el fondo de entre 15.4°C y 15.6°C, y un máximo en la superficie de entre 17.2°C y 17.6°C. Se apreció una capa mezclada de 17.2°C en los primeros 5 m de profundidad y por debajo de los 5 m se observó una estratificación de 15.4°C (en el fondo) a 16.8°C (a 5 m de profundidad).

En los paneles de la derecha observamos el efecto del viento al aumentar su magnitud por encima de los 6 m s⁻¹ y una temperatura del aire de 22°C. En las tres secciones la mezcla fue notable en toda la columna de agua con temperatura mínima en el fondo de 16.8°C y máxima en la superficie de entre 17.2°C y 17.4°C.

Entre la simulación sin descarga (fig. 5) y esta simulación de una descarga (fig. 9), se observó un incremento generalizado de la temperatura en toda la columna de agua (de 16.8°C a 17.2°C), mismo que podría deberse a la temperatura de la descarga. La capa mezclada incrementó su profundidad de 3 a 5 m, al incluir la descarga al sistema.

El patrón de circulación superficial durante la simulación en la que se incluyó una descarga se presenta en la figura 10a. En los paneles de la izquierda se observa el patrón de corrientes superficiales en forma vectorial sobre contornos de igual magnitud. En los paneles de la derecha se observa la distribución de la temperatura superficial para el mismo tiempo que los paneles de la izquierda. Se observa la variación de la circulación durante la pleamar y la bajamar, bajo condiciones de viento moderado (menos de 5 m s⁻¹) y con temperatura de 15°C. Se observa que la dirección de la velocidad es forzada por la bajamar y la pleamar. La magnitud máxima de la velocidad fue 1 cm s⁻¹ en la boca del puerto, durante el bajamar. La temperatura superficial dentro del puerto fue homogénea y cercana a 17.2°C.

Al comparar las figuras 6a y 10a podemos observar que cuando se induce una descarga al puerto, la velocidad superficial se incrementa en un 100% pasando de 0.4 a 1 cm s⁻¹ dentro del puerto, durante la bajamar y con viento moderado. Sin embargo, durante la pleamar, la corriente superficial sólo se

probablemente porque de la influencia de la open boundary imposed in the model. The lower plots (beginning of flood tide) show a temperature of 17.3°C in the northwestern part that gradually increases until reaching values of 18°C in the northern part. This figure shows greater similarity between the measurements and the simulation, even in the biased structure of temperature distribution that was satisfactorily reconstructed by the model.

Simulation with discharge

Figure 9 shows the vertical temperature distribution during the second simulation, when a discharge produced by a wave-driven seawater pump was introduced. The left-hand plots correspond to the three sections at ebb tide, with moderate winds (less than 5 m s⁻¹) and air temperature of 18°C. When the discharge was included, the minimum bottom temperature was 15.4–15.6°C and the maximum surface temperature was 17.2–17.6°C. A mixed layer of 17.2°C occurs in the first 5 m depth. Below 5 m depth, stratification of 15.4°C (at the bottom) to 16.8°C (at 5 m depth) was observed. The right-hand plots show the effect of the wind as its magnitude increases to more than 6 m s⁻¹, with an air temperature of 22°C. In the three sections, mixing was evident throughout the water column, with a minimum bottom temperature of 16.8°C and a maximum surface temperature of 17.2–17.4°C.

Between the simulation without discharge (fig. 5) and the simulation with discharge (fig. 9), a general increase in temperature is observed throughout the water column (from 16.8°C to 17.2°C). This increase could be due to the discharge temperature. The mixed layer increased its depth from 3 to 5 m when the discharge was included.

The surface circulation pattern during the simulation including the discharge is shown in figure 10a. The left-hand plots show the vectorial pattern of surface currents over contours of equal magnitude. The right-hand plots show the surface temperature distribution for the same time as the left-hand plots. The variation of the circulation during ebb and flood tides can be seen, under moderate wind conditions (less than 5 m s⁻¹) and with a temperature of 15°C. The direction of velocity is forced by the ebb and flood tides. The maximum magnitude of the velocity was 1 cm s⁻¹ at the mouth of the port during ebb tide. The surface temperature within the port was homogeneous and close to 17.2°C.

A comparison of figures 6a and 10a indicates that when a discharge is induced, surface velocity increases 100% from 0.4 to 1 cm s⁻¹ within the port during ebb tide, with moderate wind conditions; however, during flood tide, the surface current only increases to 1 m s⁻¹ in one section, but in most of the port the circulation is similar to that found when the discharge is not included.

Figure 10b shows the variation in circulation during ebb and flood tides 24 h after that shown in figure 10a, under strong wind conditions (greater than 6 m s⁻¹) and with a

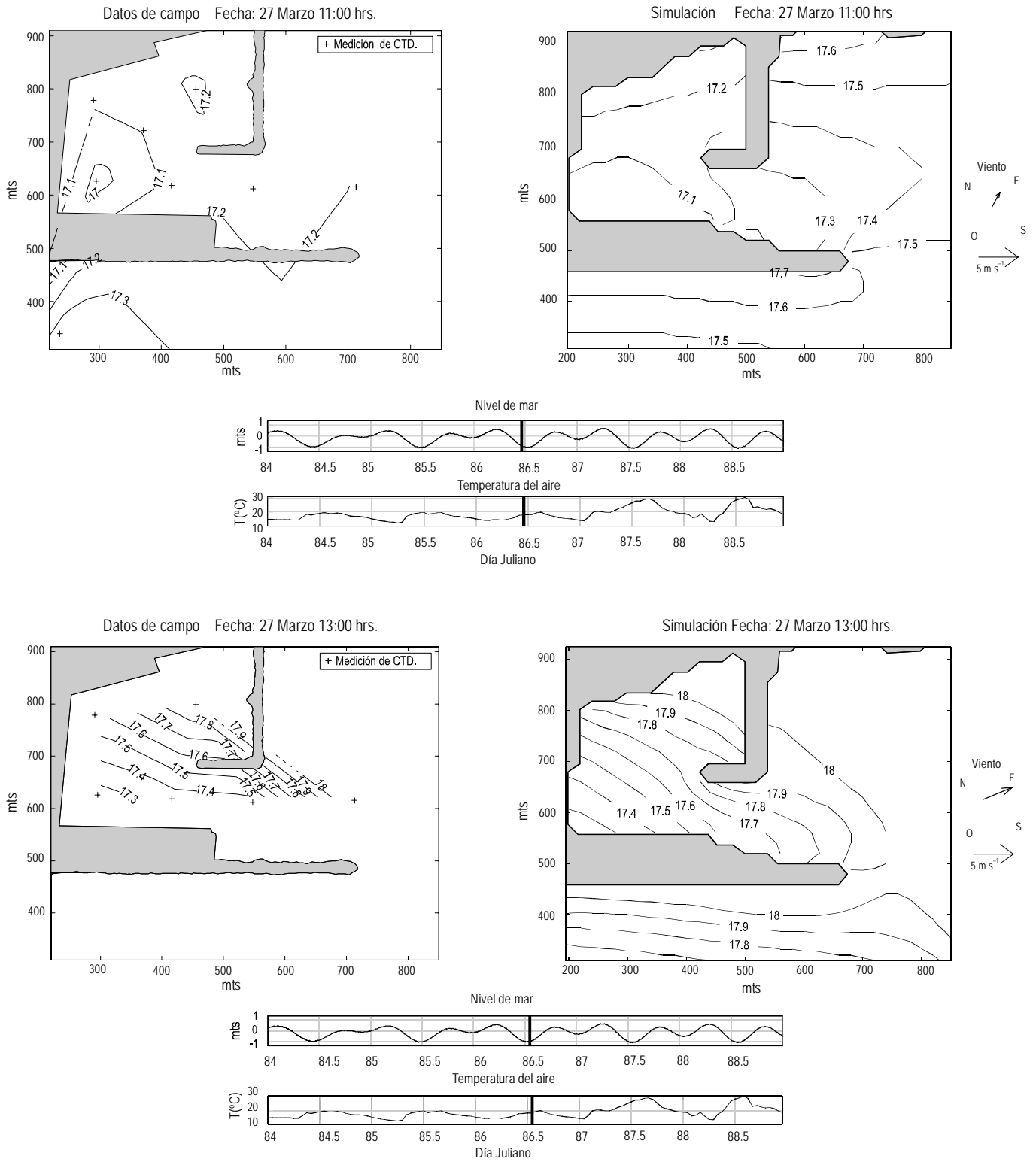


Figura 8. Comparación de la temperatura superficial medida y la simulada.
 Figure 8. Comparison of the surface temperature measured and simulated.

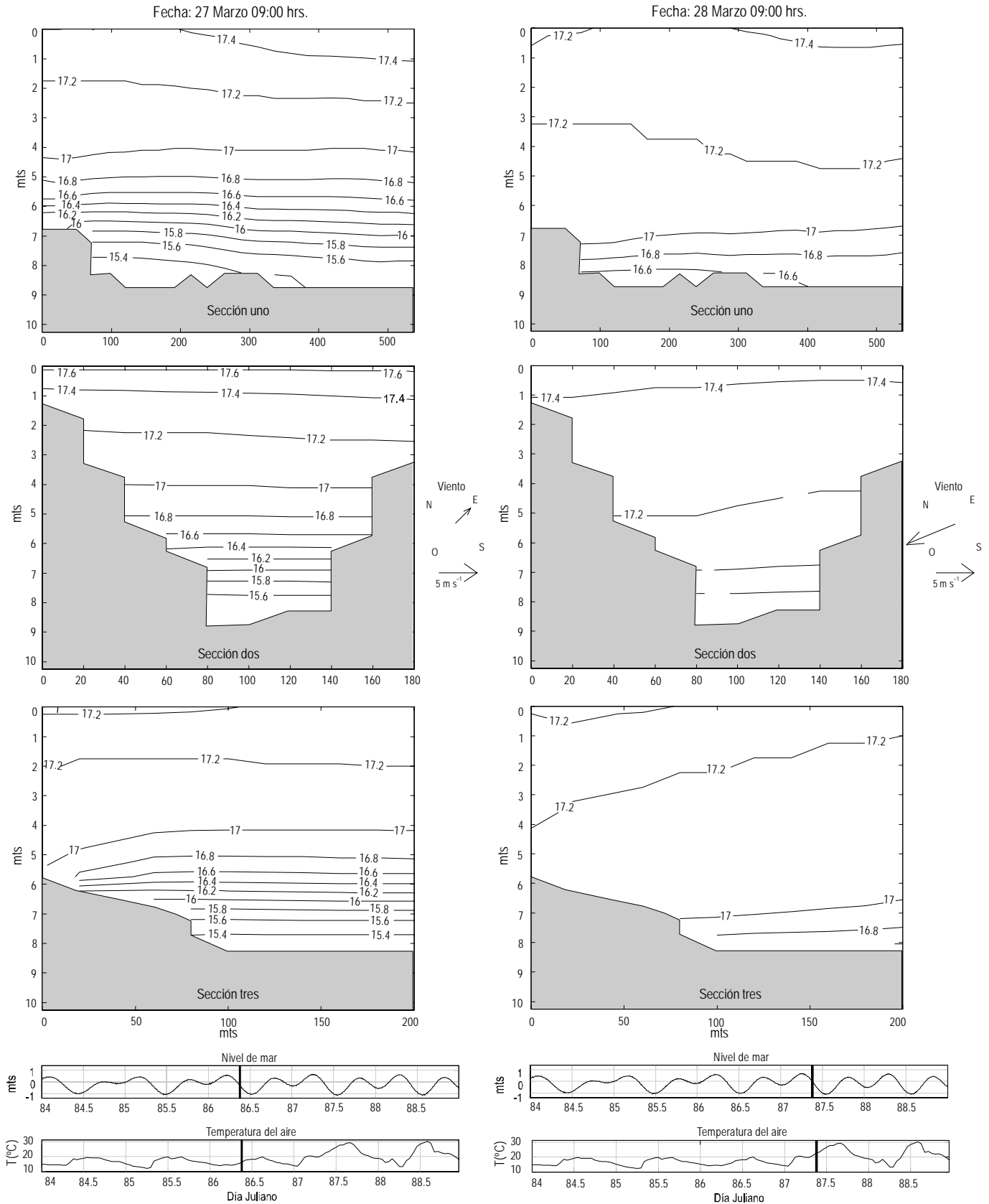


Figura 9. Distribución de la temperatura vertical en las tres secciones elegidas para la visualización, al incluir una descarga al sistema. Se aprecia la influencia de la descarga sobre una columna de agua estratificada y otra mezclada.

Figure 9. Vertical temperature distribution in the three sections chosen for the visualization when a discharge is included in the model. The influence of the discharge on a stratified and a mixed water column can be observed.

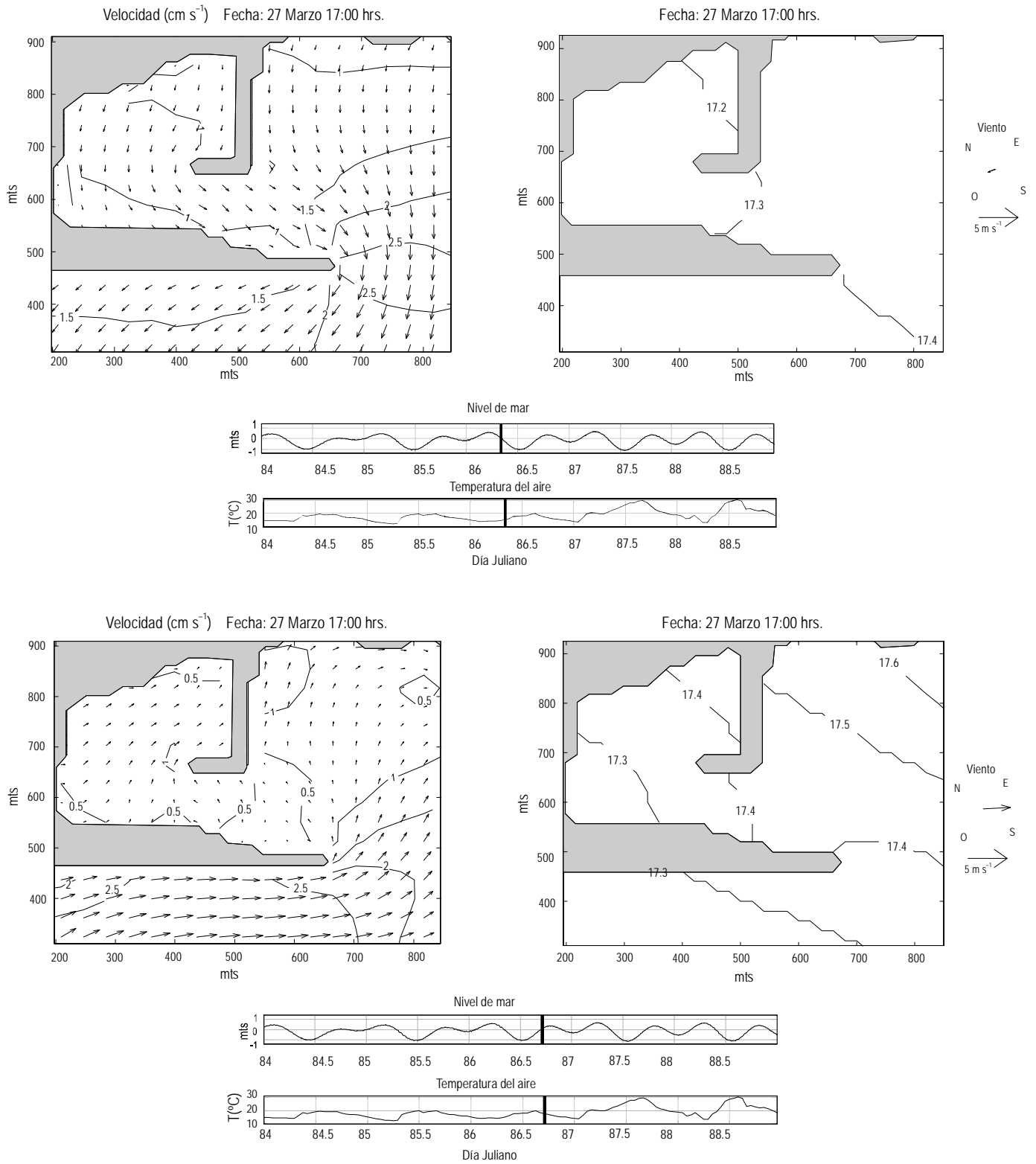


Figura 10a. Circulación superficial con viento moderado (menor de 5 m s^{-1}), al incluir una descarga al sistema.
 Figure 10a. Surface circulation with moderate winds (less than 5 m s^{-1}) when a discharge is included in the model.

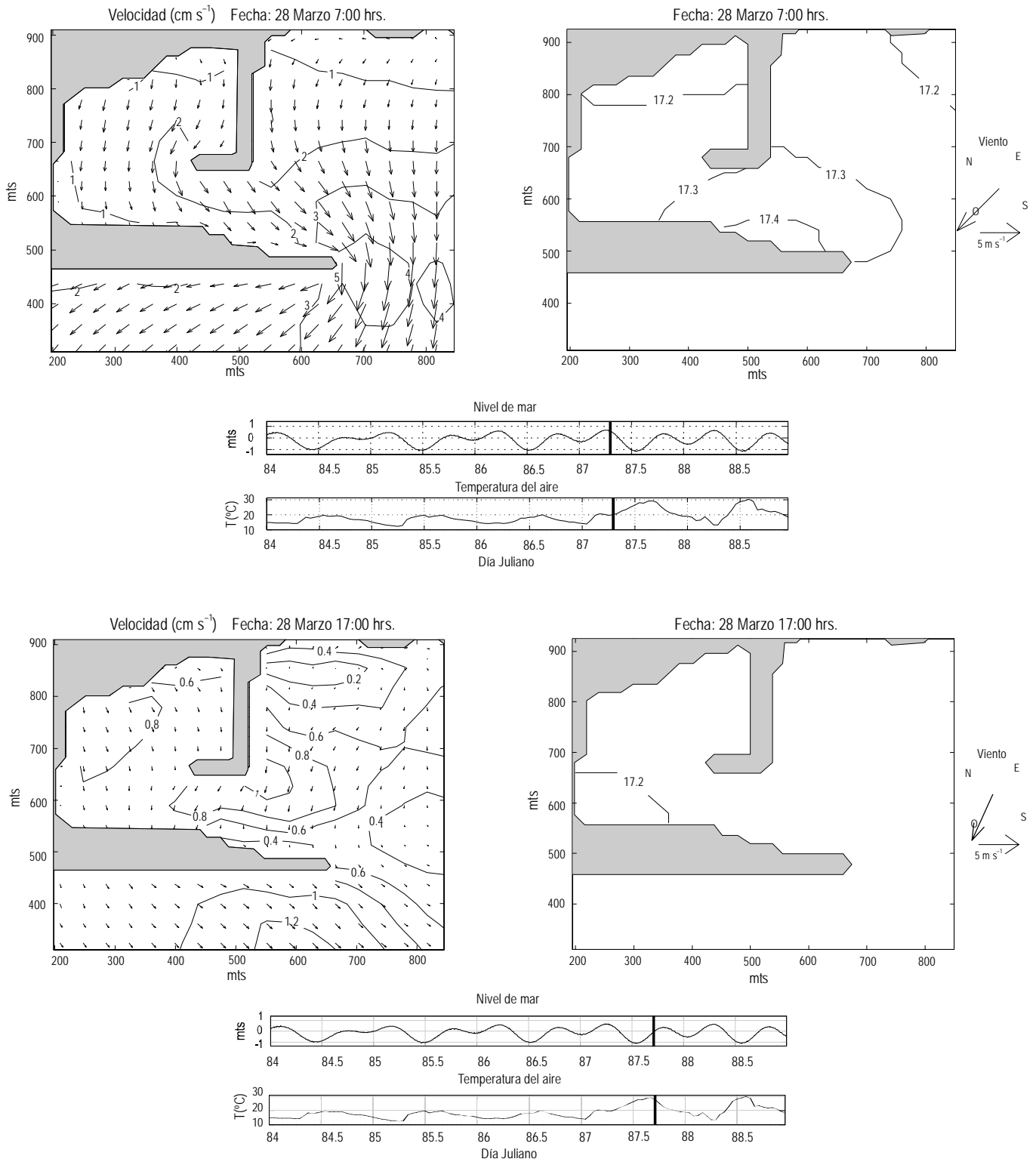


Figura 10b. Circulación superficial con viento fuerte (mayor de 6 m s^{-1}), al incluir una descarga al sistema. Se aprecia el incremento en la circulación superficial.

Figure 10b. Surface circulation with strong winds (greater than 6 m s^{-1}) when a discharge is included in the model. An increase in surface circulation is observed.

incrementa en una sección del puerto a 1 m s^{-1} , pero en la mayor parte del mismo la circulación es similar a la que ocurre sin la descarga inducida.

En la figura 10b se observa la variación de la circulación durante la pleamar y la bajamar (24 h después que la fig. 10a) bajo condiciones de viento fuerte (superior a 6 m s^{-1}) y con una temperatura que aumentó de 20°C a 30°C entre la mañana y la tarde. En esta ocasión la velocidad superficial fue dominada por el esfuerzo del viento, y la magnitud máxima de la velocidad fue de 2 cm s^{-1} en la boca del puerto, durante la bajamar. Cuando existe un viento con velocidades mayores de 6 m s^{-1} la descarga del SIBEO parece favorecer la corriente superficial inducida por el viento aumentando de 1.5 (fig. 6b) a 2 cm s^{-1} (fig. 10b) durante la bajamar y de 0.4 (fig. 6a) a 1 cm s^{-1} (fig. 10a) bajo condiciones de viento moderado y durante la pleamar.

En general, al incluir una descarga al sistema las velocidades superficiales durante la bajamar aumentaron su magnitud 0.5 cm s^{-1} , con viento moderado. En cuanto a la mezcla vertical, ésta aumentó de 3 a 5 m de profundidad al incluir la descarga (figs. 5, 9), sin dejar de notar un incremento en la temperatura global del sistema de cerca de medio grado, al incluir la descarga, lo que podría deberse a la temperatura de la descarga inducida.

Este tipo de estudios podrían comprobar que una descarga controlada, dentro de sistemas parcialmente aislados, puede aumentar la mezcla vertical y la circulación general del sistema, lo que seguramente disminuiría los tiempos de residencia del sistema y mejoraría la calidad del agua.

Agradecimientos

Esta investigación se realizó dentro del proyecto “*Flushing of the port of Ensenada using a SIBEO wave energy driven seawater pump*” apoyado por CONACYT (ref. 33354-T). Agradecemos al proyecto “Hidrodinámica de la rada del Puerto de Ensenada” apoyado por SINVE (ref. 621137); al Capitán Ricardo Thomson, de la administración portuaria del Puerto de El Sauzal, por el apoyo durante los muestreos y las embarcaciones facilitadas; a Felipe Hernández-González operador de las embarcaciones por su apoyo logístico y la seguridad durante los muestreos; y a la Secretaría de Marina (SEMAR) por facilitarnos los datos meteorológicos para la realización de este estudio.

Referencias

- Arakawa, A. and Lamb, V. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods Comput. Phys.*, 17: 173–265.
- Argote-Espinoza, M.L., Gavidia-Medina, F.J. and Amador-Buenrostro, A. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos Bay, B.C., Mexico. *Atmósfera*, 4: 101–115.
- Casulli, V. and Cattani, E. (1994). Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three dimensional shallow water flow. *Comput. Math. Applic.*, 27: 99–112.

temperature that increased from 20°C to 30°C between the morning and afternoon. On this occasion, surface velocity was dominated by wind stress and the maximum magnitude was 2 cm s^{-1} at the port's mouth during ebb tide. When the wind is stronger than 6 m s^{-1} , the discharge produced by the wave-driven seawater pump favours the wind-generated surface current, increasing from 1.5 (fig. 6b) to 2 cm s^{-1} (fig. 10b) during ebb tide and from 0.4 (fig. 6a) to 1 cm s^{-1} (fig. 10a) with moderate wind conditions and during ebb tide.

In general, surface velocity increased 0.5 cm s^{-1} in magnitude during low tide when a discharge was included in the system, under moderate wind conditions. Vertical mixing increased from 3 to 5 m depth with the discharge (figs. 5, 9), and there was an increase in overall temperature of nearly half a degree, which could be due to the discharge temperature.

Similar studies could further verify that a controlled discharge within a partially isolated system increases vertical mixing and the general circulation, which would reduce residence times and improve the water quality.

Acknowledgements

This work forms part of the project “*Flushing of the port of Ensenada using a SIBEO wave-energy-driven seawater pump*”, funded by CONACYT (ref. 33354-T). We acknowledge the project “*Hidrodinámica de la rada del puerto de Ensenada*”, funded by SINVE (ref. 621137). We thank Captain Ricardo Thomson (El Sauzal port management) for providing vessels and assistance during the samplings, Felipe Hernández-González (vessel operator) for logistical support and security during the samplings, and the Ministry of the Navy (SEMAR) for providing the meteorological data for this study.

English translation by Christine Harris.

- Casulli, V. and Cheng, R.T. (1992). Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow. *International J. Numer. Methods Fluids*, 15: 629–648.
- Cheng, R., Casulli, V. and Gartner, J. (1993). Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) model and its applications to San Francisco Bay, California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 36: 235–280.
- Coronado, C.A., Ramírez, I. y Czitrom, S. (2002). Batimetría del puerto de El Sauzal, B.C., México. *Comunicaciones Académicas*, Depto. Oceanografía Física, CICESE (proyecto interno 6775) (CTOFT20025), 21 pp.
- Czitrom, S., Núñez, I. and Ramírez, I. (2002). Innovative uses of wave power: Environmental management of the port of Ensenada, Mexico. *J. Mar. Technol. Soc.*, 36(4): 74–84.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C., Imberger, J. and Brooks, N. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.
- Flores, X., Ramírez, I., Coronado, C. y Czitrom, S. (2003). Perfiles de CTD y de velocidad en el puerto del Sauzal, B.C., México. *Comunicaciones Académicas*, Depto. Oceanografía Física, CICESE (proyecto interno 6775) (9174), 69 pp.
- Leendertse, J., Alexander, R. and Liu, S. (1973). A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: Principles of computation. Internal Rep., RAND Corp. (California).

- Nepf, H.M. and Geyer, W.R. (1996). Intratidal variations in stratification and mixing in the Hudson estuary. *J. Geophys. Res.*, 101(C5): 12079–12086.
- Núñez, M. (1994). Estudio preliminar de algunas propiedades químicas indicadoras de contaminación orgánica en El Sauzal de Rodríguez. Tesis, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 84 pp.
- Ramírez, I. and Imberger, J. (2002). The numerical simulation of the hydrodynamics of Barbamarco Lagoon, Italy. *Appl. Numer. Math.*, 40: 273–289.
- Rivera, D.I. (1984). Comportamiento de los contaminantes derivados de la industria en el Puerto del Sauzal. Tesis, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 72 pp.
- Segovia-Zavala, J.A., Rivera, I. y Del Valle-Villorín, F.J. (1988). Efectos de desechos orgánicos en las zonas adyacentes a los efluentes en Bahía de Todos Santos. *Cienc. Mar.*, 14(1): 81–94.